

ANDRÉ GOMES VIDEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE SUBSÍDIOS PARA APLICAÇÃO EM
TESTES DE AVALIAÇÃO DE PARA-RAIOS DE ZNO**

**FLORIANÓPOLIS
2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

André Gomes Videira

**DESENVOLVIMENTO DE SUBSÍDIOS PARA APLICAÇÃO EM
TESTES DE AVALIAÇÃO DE PARA-RAIOS DE ZNO**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Patrick Kuo-Peng

Co-orientador: Prof. Dr. Nelson Jhoe
Batistela

Florianópolis, Março de 2011

André Gomes Videira

DESENVOLVIMENTO DE SUBSÍDIOS PARA APLICAÇÃO EM TESTES DE AVALIAÇÃO DE PARA-RAIOS DE ZNO

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 18 de Março de 2011

Prof. Roberto de Souza Salgado, PhD.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.
Orientador

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Co-Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.
Presidente

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Prof. José Pissolato Filho, Dr.

Prof. Jacqueline Gisele Rolim,
Dr.

Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Eng. Lúcio Volnei Galvani, Ms.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

DESENVOLVIMENTO DE SUBSÍDIOS PARA APLICAÇÃO EM TESTES DE AVALIAÇÃO DE PARA-RAIOS DE ZNO

André Gomes Videira

Março/2011

Orientador: Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.

Co-orientador: Prof. Nelson Jhoef Batistela, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos

Eletromagnéticos

Palavras-chave: Para-raios de alta tensão, varistor, corrente de fuga, degradação de para-raios

Número de Páginas: 109

RESUMO: Este trabalho apresenta como proposta principal verificar as influências externas, como a temperatura e harmônicos na rede sobre a corrente de fuga de para-raios para a avaliação de seu estado de operação, bem como a distribuição e o comportamento campos elétricos e magnéticos existentes em uma subestação no local da medição. Através de simulações, verificam-se possíveis influências sobre os valores medidos e os instrumentos de medição de corrente de fuga total, a corrente de fuga resistiva e a componente de terceira harmônica da corrente de fuga total, possibilitando maior segurança na avaliação do para-raios. Desenvolveu-se também um instrumento virtual para a obtenção da forma de onda da corrente resistiva, seu valor eficaz, de pico e suas harmônicas, baseado em uma metodologia para a separação das correntes resistiva e capacitiva a partir das formas de onda da corrente total e da tensão. Com base nos estudos e ensaios práticos realizados em subestação, se propôs uma metodologia para a padronização da realização de ensaios, visando uma maior confiabilidade na obtenção dos resultados da avaliação.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

SUBSIDY DEVELOPMENT FOR APPLICATION IN TESTS FOR THE EVALUATION OF ZNO SURGE ARRESTERS

André Gomes Videira

March/2011

Advisor: Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.

Co-advisor: Prof. Nelson Jhoef Batistela, Dr.

Área of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices

Keywords: High voltage surge arrester, varistor, leakage current, surge arrester degradation

Number of Pages: 109

ABSTRACT: This work presents the study of external influences, such as temperature and voltage harmonics and on the measurement of surge arrester leakage current for the evaluation of its operation condition and the distribution of electric and magnetic fields in a substation on the measurement place. The external factors that influence on the measured total leakage current, resistive leakage current and the third harmonic component of the total leakage current was verified by simulation, increasing the measurement reliability. A virtual instrument to obtain the resistive leakage current waveform, its rms, and peak values and its harmonics was developed based on a methodology for separating the resistive and capacitive current from the total leakage current and voltage waveform. Based on this study and practical measurements performed at a substation, a methodology for standardizing the measurements of leakage current was proposed, increasing the reliability on the surge arrester evaluation condition.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Estrutura da dissertação	3
2. PARA-RAIOS	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Histórico	6
2.3. Para-raios de ZnO.....	9
2.3.1. Características construtivas	9
2.3.2. Corrente de fuga	11
2.3.3. Especificações do para-raios	12
2.4. Sobretensões	13
2.4.1. Sobretensões temporárias	16
2.4.2. Sobretensões transitórias	16
2.4.3. Sobretensão combinada.....	17
2.4.4. Descargas atmosféricas	17
2.5. Fatores de degradação de para-raios	17
2.5.1. Perda da estanqueidade e penetração da umidade	17
2.5.2. Contaminação externa	18
2.5.3. Descargas internas.....	18
2.5.4. Descargas de longa duração ou de alta intensidade com curta duração.....	18
2.6. Técnicas para a avaliação de para-raios de ZnO.....	19
2.6.1. Medição da resistência de isolamento	19
2.6.2. Medição de perdas dielétricas	20
2.6.3. Contador de descargas.....	20
2.6.4. Termografia.....	20
2.6.5. Medição da corrente de fuga	22
2.7. Considerações gerais	23
3. INSPEÇÃO DE PARA-RAIOS ZNO ATRAVÉS DA AVALIAÇÃO DA CORRENTE DE FUGA	24
3.1. Introdução.....	24
3.2. Medição da corrente de fuga.....	24
3.3. Propriedades da corrente de fuga de varistores de ZnO.....	25
3.3.1. Corrente de fuga capacitiva.....	26
3.3.2. Corrente de fuga resistiva.....	27

3.3.3.	Harmônicas na corrente de fuga total.....	28
3.3.4.	Energia dissipada	29
3.3.5.	Corrente de fuga superficial	29
3.4.	Medição da corrente de fuga total	29
3.5.	Medição da corrente resistiva ou energia dissipada.....	30
3.5.1.	Medição direta da corrente de fuga resistiva.....	31
3.5.2.	Determinação da corrente de fuga resistiva através da análise harmônica	32
3.5.3.	Determinação direta da energia dissipada	34
3.6.	Correção da corrente resistiva	34
3.7.	Sumário das técnicas de avaliação através da corrente de fuga..	35
3.8.	Considerações gerais	36
4.	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE HARMÔNICOS, TEMPERATURA, AMPLITUDE DA TENSÃO E DEGRADAÇÃO SOBRE A CORRENTE DE FUGA	38
4.1.	Introdução.....	38
4.2.	Análise da influência de harmônicos na tensão	38
4.2.1.	Influência da presença de 3º harmônico na tensão da rede sobre a corrente resistiva	41
4.2.2.	Influência da presença de 5º harmônico na tensão da rede sobre a corrente resistiva	43
4.2.3.	Influência da presença de harmônicos na tensão da rede sobre a corrente total.....	45
4.3.	Influência da variação da amplitude de tensão	46
4.4.	Análise da influência da temperatura	48
4.5.	Análise da degradação dos para-raios	52
4.6.	Considerações gerais	53
5.	ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DOS CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS NO AMBIENTE DE MEDIÇÃO DE CORRENTE DE FUGA	55
5.1.	Introdução.....	55
5.2.	Influências de campos externos em medições	55
5.3.	Estudo numérico da influência dos campos	60
5.3.1.	Estudo do campo magnético	61
5.3.2.	Estudo do campo elétrico	72
5.4.	Considerações gerais	81
6.	MÉTODO PARA SEPARAÇÃO DAS CORRENTES CAPACITIVA E RESISTIVA	82
6.1.	Introdução.....	82
6.2.	Método para separação da corrente resistiva	83

6.3.	Programa de separação das correntes	84
6.4.	Influência de harmônicos da tensão sobre as correntes de um para-raios.....	90
6.5.	Considerações gerais	92
7.	ANÁLISE DE MEDIÇÕES.....	93
7.1.	Introdução.....	93
7.2.	Medições em campo	93
7.3.	Sugestões de padronização das medições de corrente de fuga .	100
7.4.	Considerações gerais	101
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CSV - Comma Separated Value

ELETROSUL - Eletrosul Centrais Elétricas S.A.

et al. - Abreviação da expressão "et alli", correspondendo a "e outros"

GIS - Gas insulated substations (Subestações isoladas em gás SF₆)

GT - Grupo de Trabalho

IEC - International Electrotechnical Commission

LALTE - Laboratório de Alta Tensão da ELETROSUL

NA - Não aplicável

NBR - Norma Brasileira da ABNT

pu - por unidade

SA - Sem avaliação

SiC - Carboneto de Silício

VI - Virtual Instrument (instrumento virtual)

ZnO - Óxido de Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

a - Parâmetro de ajuste da função de Langevin

C_p - Capacitância do para-raios

dU/dt - Derivada temporal da tensão no sistema

E_x - Componente horizontal do campo elétrico

E_y - Componente vertical do campo elétrico

f - frequência da rede

H_x - Componente horizontal do campo magnético

H_y - Componente vertical do campo magnético

Hz - Hertz

I_{3c} - Componente de 3a harmônica da corrente capacitiva

I_{3r} - Componente de 3a harmônica da corrente resistiva

I_{3t} - Componente de 3a harmônica da corrente total

I_c - Corrente capacitiva de fuga

$I_c(t)$ - Corrente capacitiva em função do tempo

I_{cmax} - Corrente capacitiva máxima

I_r - Corrente resistiva de fuga

$I_r \text{ corr}$ - Corrente resistiva corrigida com relação a temperatura e amplitude de tensão

$i_r(t)$ - Corrente resistiva em função do tempo

I_t - Corrente de fuga total

$i_t(t)$ - Corrente total em função do tempo

kV - Quilovolt

mA - Miliamperes

ms - Milissegundos

mW - Miliwatt

pF - Picofaraday

R_p - Resistor não-linear principal

T_1 - Tempo até a crista da sobretensão

T_2 - Tempo até meio valor

U_c - Tensão de operação contínua

U_m - Tensão máxima do equipamento

U_s - Tensão de sobretensão

V - Tensão sobre o para-raios

V_{ef} - Tensão eficaz da rede

X_c - Reatância capacitiva

β - Constante de modificação da função de Langevin

μ - Permeabilidade magnética

μ_o - Permeabilidade magnética do ar

μs – Microssegundos

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Característica tensão x corrente de um para-raios ideal
- Figura 2 - Para-raios ensaiado por Franklin em 1752
- Figura 3 - Curvas características de para-raios com varistores de ZnO e SiC
- Figura 4 - Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensão
- Figura 5 - Para-raios de ZnO com invólucro de porcelana (esquerda) e polimérico (direita) – Catálogo ABB
- Figura 6 - Circuito equivalente simplificado do para-raios
- Figura 7 - Classes e formas de onda das solicitações de tensão
- Figura 8 - Exemplos de termogramas de a) Para-raios em condição normal e b) Para-raios em condição defeituosa
- Figura 9 - Corrente de fuga para um mesmo para-raios quando novo e degradado
- Figura 10 - Corrente de fuga típica para um varistor de ZnO para condições de laboratório
- Figura 11 - Dependência com relação à tensão para a temperatura de 20° C
- Figura 12 - Dependência com relação à temperatura para a tensão U_c
- Figura 13 - Relação entre a variação das correntes de fuga resistiva e total
- Figura 14 - Informação para correção de tensão operacional em serviço
- Figura 15 - Informação para correção de temperatura ambiente
- Figura 16 - Algoritmo numérico do modelo de varistor proposto por James Silveira
- Figura 17 - Ir sem a presença de harmônicos na tensão
- Figura 18 - Ir com 1% de harmônicos na tensão defasado de 180°
- Figura 19 - Ir com 5% de harmônico na tensão defasado de 180°
- Figura 20 - Comparação entre correntes resistivas com e sem a presença de 3° harmônico na tensão
- Figura 21 - Ir com 1% de 5° harmônico na tensão sem defasagem
- Figura 22 - Ir com 5% de 5° harmônico na tensão sem defasagem
- Figura 23 - Comparação entre correntes resistivas com e sem a presença de 5° harmônico na tensão
- Figura 24 - Corrente resistiva com o aumento da amplitude da tensão
- Figura 25 - Correntes obtidas com o aumento da temperatura – 0,5pu
- Figura 26 - Correntes obtidas com o aumento da temperatura – 0,8pu
- Figura 27 - Correntes obtidas com o aumento da temperatura – 1,0pu
- Figura 28 - Correntes obtidas com o aumento da temperatura – 1,1pu

- Figura 29 - Medições com a sonda de campo elétrico variando para o lado oposto do cabo de aterramento
- Figura 30 - Medições com a sonda de campo elétrico variando para o lado do cabo de aterramento
- Figura 31 - Medições com a sonda de campo elétrico variando a distância e a altura em relação ao pedestal
- Figura 32 - Distribuição do campo magnético para corrente nula na fase A
- Figura 33 - Distribuição do campo magnético para corrente máxima na fase A
- Figura 34 - Defasagem entre correntes e componentes de campo magnético externo – Fase A
- Figura 35 - Comparação entre componentes de campo magnético – Fase A
- Figura 36 - Defasagem entre a corrente e componentes de campo magnético externo – Fase B
- Figura 37 - Comparação entre componentes de campo magnético – Fase B
- Figura 38 - Defasagem entre corrente e componentes do campo magnético externo – Fase C
- Figura 39 - Comparação entre componentes de campo magnético – Fase C
- Figura 40 - Módulos dos campos magnéticos sob as fases A, B e C
- Figura 41 - Distribuição do campo na base do para-raios sem presença de sonda de corrente
- Figura 42 - Distribuição do campo na base do para-raios com a presença de sonda de corrente
- Figura 43 - Distribuição do campo elétrico para tensão nula na fase A
- Figura 44 - Distribuição do campo elétrico para tensão máxima na fase A
- Figura 45 - Defasagem entre tensão de fase e componentes do campo elétrico externo – Fase A
- Figura 46 - Comparação entre componentes de campo elétrico – Fase A
- Figura 47 - Defasagem entre tensão de fase e componentes do campo elétrico externo – Fase B
- Figura 48 - Comparação entre componentes de campo elétrico – Fase B
- Figura 49 - Defasagem entre tensão de fase e componentes do campo elétrico externo – Fase C

- Figura 50 - Comparação entre componentes de campo elétrico – Fase C
- Figura 51 - Módulos dos campos elétricos sob as fases A, B e C
- Figura 52 - Circuito para medição da corrente resistiva
- Figura 53 - Fluxograma do programa desenvolvido em Labview
- Figura 54 - Painel frontal do programa de separação de correntes – 30kV
- Figura 55 - Painel frontal do programa de separação de correntes – 90kV
- Figura 56 - Corrente total de pico em função da tensão aplicada sobre o para-raios
- Figura 57 - Corrente resistiva de pico em função da tensão aplicada sobre o para-raios
- Figura 58 - Corrente de terceiro harmônico em função da tensão aplicada sobre o para-raios
- Figura 59 - Variação da temperatura durante as medições
- Figura 60 - Variação da umidade relativa do ar durante as medições
- Figura 61 - Corrente de fuga total medida
- Figura 62 - 3ª harmônica da corrente de fuga total medida
- Figura 63 - Comparação entre correntes em linha de alto conteúdo harmônico

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Métodos de monitoramento que utilizam a medição de corrente de fuga

Tabela 4.1 – Valores de 3ª harmônica medidos

Tabela 4.2 – Influência da amplitude da tensão na corrente

Tabela 4.3 – Parâmetros utilizados para diferentes temperaturas

Tabela 4.4 – Influência da temperatura do varistor na corrente

Tabela 4.5 – Influência da degradação do para-raios na corrente

Tabela 5.1 – Instrumentos de medição

Tabela 5.2 – Medições com a sonda de corrente ao ar livre

Tabela 5.3 – Medições com variação na posição da sonda de tensão

Tabela 6.1 – Valores de corrente obtidos através do programa para um para-raios real

Tabela 6.2 – Valores de corrente medidos – PR7300064

Tabela 6.3 – Valores de corrente harmônica obtidos

Tabela 7.1 – Variação nos valores de corrente medidos ao longo do dia

1. Introdução

A qualidade e a confiabilidade do sistema de energia elétrica estão associadas ao fornecimento da energia de forma ininterrupta e sem perturbações momentâneas significativas. Os índices de qualidade da rede elétrica podem ser influenciados por diversos fatores envolvendo variações súbitas de tensões e correntes, submetendo os equipamentos da subestação a condições severas e que podem ultrapassar suas capacidades nominais [1, 2]. Dentre os fenômenos que ameaçam a confiabilidade do sistema, podem-se citar as sobretensões, classificadas em internas, quando provenientes de ocorrências no sistema, ou externas, quando geradas por distúrbios atmosféricos. As descargas atmosféricas merecem maior atenção, seja por terem sido reportadas como a principal causa de desligamentos não programados [1] ou pela imprevisibilidade de sua ocorrência e extensão dos danos que podem causar. As descargas atmosféricas podem ocorrer diretamente, tendo consequências normalmente severas, ou indiretamente, devido a tensões induzidas por descargas próximas às linhas de transmissão. Apesar de causarem menor dano, as descargas indiretas são mais frequentes [3].

Os para-raios de alta tensão têm sido largamente utilizados em sistemas de potência na proteção contra sobretensões. Estes equipamentos atuam como limitadores de tensão, mantendo-a em valores aceitáveis e evitando danos a outros equipamentos, normalmente de custos mais elevados [3]. Do ponto de vista construtivo, é um equipamento bastante simples, sendo constituído basicamente de um elemento resistivo não-linear associado ou não a um centelhador em série.

Os para-raios são conectados entre a linha e a terra, estando continuamente submetidos à tensão normal de operação do sistema, atuando neste caso como um circuito aberto. Entretanto, quando devido a alguma falha, descarga elétrica ou manobra no sistema ocorre um surto, provocando uma sobretensão que supere a tensão de descarga do para-raios, uma parcela da corrente circula pelo seu resistor não-linear, impedindo que a tensão nos seus terminais ultrapasse um valor pré-definido, protegendo os demais equipamentos das subestações.

Diversos fatores podem contribuir para a degradação do para-raios. Entre eles, pode-se destacar a perda da estanqueidade e penetração da umidade, contaminação externa do invólucro, descargas parciais internas, descargas de longa duração ou de curta duração com alta

intensidade. Alguns desses fatores, contribuindo isoladamente ou em conjunto, podem provocar a atuação do dispositivo para a tensão operativa do sistema, provocando explosão ou queima [4].

Para desempenhar satisfatoriamente sua função e manter sua confiabilidade, o para-raios necessita de avaliações periódicas que atestem sua condição normal de operação. Diversos tipos de ensaios são utilizados na avaliação dos para-raios, sendo os principais a inspeção termográfica e a medição da sua corrente de fuga.

A inspeção térmica é amplamente utilizada na avaliação dos para-raios, embora tenha somente a capacidade de constatar problemas já existentes. Esta utilização ainda é frequente devido a confiança que as equipes de manutenção têm na técnica, que sempre foi aplicada aos para-raios de carboneto de silício (SiC) e outros equipamentos elétricos.

A maioria dos métodos atualmente desenvolvidos para diagnóstico para para-raios de ZnO são baseados na avaliação através do monitoramento da corrente de fuga. Estas técnicas têm a grande vantagem de poder prever problemas. A corrente de fuga é composta de duas componentes, sendo uma capacitiva linear (função da estrutura do para-raios) e outra resistiva não-linear (função da corrente no varistor). A deterioração das propriedades isolantes dos varistores do para-raios irá acarretar em um aumento da componente resistiva da corrente de fuga [5], de modo que a variação dos valores desta componente indica o estado de sua degradação.

Como sendo uma técnica de manutenção preventiva, a medição da corrente de fuga seja feita com o para-raios em operação (*on-line*). Essa medição pode ser realizada através de instrumentos de monitoramento de corrente de fuga, podendo ser fixos ou portáteis, cada um com características e métodos de medição diferentes.

Lembra-se que a preocupação na avaliação dos para-raios é algo recente, onde algumas concessionárias já estão fazendo pesquisa e estudos a respeito do assunto, atualizando tecnológica e cientificamente seus quadros, desenvolvendo metodologias de manutenção próprias. Com o aumento do parque e a penalização pela indisponibilidade das funções da rede básica do sistema de transmissão, juntamente com a ampliação da planta elétrica brasileira, há a elevação do número de para-raios em operação. Isto justifica o estudo e o desenvolvimento de metodologias de avaliação do estado operacional do para-raios.

Nesta dissertação são abordadas as metodologias de avaliação das condições operacionais dos para-raios de ZnO por meio da corrente de fuga. São apresentados estudos de fatores que podem influenciar no resultado da medição de corrente de fuga de um para-raios em operação,

como a existência de harmônicos na rede, a temperatura ambiente e a existência de campos elétricos e magnéticos externos, presentes na subestação devido aos condutores de alta tensão. Também é apresentada uma metodologia para a separação das correntes resistiva e capacitiva a partir da corrente de fuga total e da tensão aplicada sobre o para-raios. Esta metodologia proporcionou a implementação de um Instrumento Virtual em LabView.

1.1. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é realizar uma análise das influências externas, como a temperatura, a existência de harmônicos na rede e campos elétricos e magnéticos existentes na subestação, sobre a medição da corrente de fuga de para-raios para a avaliação de seu estado de operação. Para isso, são utilizados programas de simulações e também medições práticas realizadas com o apoio da ELETROSUL.

Verificou-se que através da análise das influências e das metodologias de medição de corrente de fuga, podem-se gerar procedimentos mais confiáveis e seguros na avaliação dos para-raios de ZnO.

Neste trabalho, será também apresentada uma metodologia para a separação das componentes resistiva e capacitiva da corrente de fuga, através de arquivos *CSV* (*comma separated value*), obtidos na medição da corrente de fuga e da tensão sobre o para-raios com o auxílio de um osciloscópio.

1.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em 8 capítulos, abordando as revisões bibliográficas sobre o tema e os estudos e ensaios realizados.

No capítulo 2 é apresentado um estudo sobre os para-raios, sua importância para o sistema elétrico e sua evolução. É dado enfoque nos para-raios de ZnO, com suas principais características, alguns dos principais fatores de degradação e uma apresentação sucinta dos métodos utilizados para a avaliação de seu estado de operação.

O capítulo 3 apresenta especificamente e em maiores detalhes a avaliação de para-raios através da medição da corrente de fuga. Serão apresentadas as diferentes técnicas utilizadas nesta forma de avaliação, assim como alguns fatores que podem influenciar nos valores de corrente medidos.

No capítulo 4 é apresentado um estudo da análise das influências causadas por harmônicos na tensão da rede, temperatura e variação de tensão sobre as medições de corrente de fuga. Também é apresentado um estudo da variação das correntes em um para-raios degradado. Para estes estudos, foram feitas simulações utilizando um instrumento virtual em LabView, desenvolvido por James Silveira e descrito na literatura [3].

O capítulo 5 apresenta o estudo da análise da distribuição e comportamento de campos elétricos e magnéticos existentes em uma subestação na altura da base do para-raios, local onde é realizada a medição. Foram realizadas simulações utilizando o método de elementos finitos através do software EFCAD, analisando as formas de onda, defasagens e amplitudes nos para-raios de cada fase da linha.

No capítulo 6 é apresentado um método de separação das componentes capacitiva e resistiva da corrente de fuga. Para isso, são utilizadas as formas de onda da corrente de fuga total e da tensão sobre o para-raios. Neste capítulo é também apresentado o desenvolvimento de um instrumento virtual em LABVIEW empregando este método.

O capítulo 7 apresenta medições práticas realizadas em subestações com o apoio da ELETROSUL, analisando os efeitos das influências estudadas anteriormente sobre as medições.

No capítulo 8 são apresentadas as considerações finais e propostas de continuidade do tema deste trabalho.

2. Para-raios

2.1. Introdução

Os equipamentos de uma subestação estão sujeitos a diversos tipos de sobretensões que podem danificá-los, sejam elas devido a surtos no sistema, manobras ou descargas atmosféricas, sendo estas últimas as maiores causas de desligamentos. Adicionalmente, os desligamentos não programados causam distúrbios no suprimento e na oferta de energia, acarretando na perda de faturamento em diversos casos [6]. Para a proteção dos equipamentos da subestação, normalmente de alto custo, e a redução dos índices de desligamento não programados, é necessária a instalação de dispositivos de proteção que mantenham a qualidade e confiabilidade do sistema, sendo os para-raios os equipamentos mais adequados para esta finalidade [7].

Os para-raios são conectados entre o condutor de energia e a terra, tendo a tensão operacional do sistema aplicada continuamente sobre seus terminais. Idealmente, o dispositivo deve possuir as seguintes características [8, 9, 10]:

- a) Sob tensão normal, apresentar uma impedância infinita, se comportando como um circuito aberto e não afetando a operação do sistema;
- b) Mudar seu comportamento instantaneamente, entrando em condução quando da ocorrência de uma sobretensão, sob uma característica tensão-corrente não-linear mantendo a tensão sobre o equipamento que protege no nível de seu valor nominal;
- c) Extinguir a corrente de descarga, normalizando a operação do sistema.

A Figura 1 apresenta a característica tensão-corrente de um para-raios ideal.

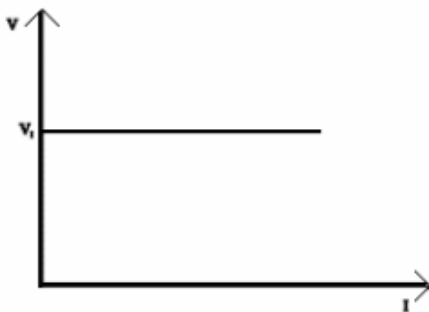


Figura 1 - Característica tensão x corrente de um para-raios ideal [9]

Os para-raios atualmente disponíveis no mercado não apresentam plenamente as características do dispositivo ideal. Caso a característica do material utilizado no para-raios seja suficientemente não-linear, o equipamento apresenta um comportamento similar a um resistor não-linear, como é o caso dos para-raios de óxido de zinco (ZnO) atuais.

Para desempenhar satisfatoriamente sua função e manter a confiabilidade, o para-raios necessita de avaliações periódicas que atestem sua condição normal de operação. Na ocasião de falhas, as consequências podem ser muito sérias, tanto para o sistema elétrico quanto para as pessoas que trabalham na subestação.

Apesar de serem dispositivos utilizados há muito tempo, ainda não existem técnicas de diagnóstico consensuais para indicar quando um para-raios deve ser retirado de operação. Embora algumas técnicas de avaliação, como a inspeção térmica e a medição da corrente de fuga, sejam bastante difundidas e ofereçam bons resultados, não há uma uniformização de procedimentos para a avaliação do estado funcional do para-raios [9].

2.2. Histórico

Com a descoberta da eletricidade no início do século XVIII, a natureza elétrica da Terra começou a ser desvendada. Benjamin Franklin foi o primeiro a projetar um experimento para tentar provar a natureza elétrica do relâmpago [11]. Segundo sua hipótese, as nuvens eram eletricamente carregadas, sendo o relâmpago um fenômeno elétrico. Em 1752, esta experiência foi realizada, ao montar um mastro metálico isolado da terra com um fio de cobre próximo, ligado à terra. Ao se aproximar o fio de cobre e o mastro durante uma trovada, observaram-

se faíscas, comprovando a hipótese de Franklin [3]. Esta experiência também serviu para mostrar que este dispositivo, quando ligado à terra, pode atrair as descargas atmosféricas, proporcionando proteção contra raios. A Figura 2 apresenta o para-raios do experimento de Franklin.

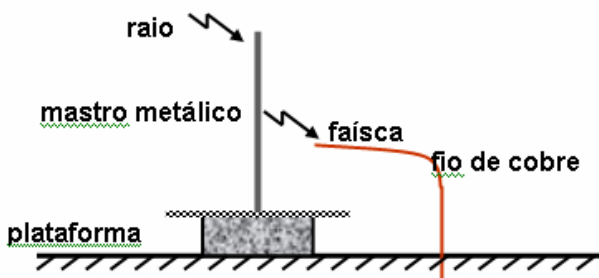


Figura 2 - Para-raios ensaiado por Franklin em 1752 [11]

Após a descoberta de Franklin, a forma de atuação do para-raios ficou conhecida, com a tecnologia se desenvolvendo até que chegasse aos para-raios empregados atualmente.

Os primeiros para-raios utilizados em sistemas de potência consistiam em simples centelhadores (também chamados de “gap”), do tipo “chifre”, instalado entre a terra e o condutor de energia em terminações de linha e equipamentos mais importantes, deixando um espaço apenas com ar [8, 12]. Os “gaps” eram projetados de modo que houvesse o rompimento do dielétrico entre os eletrodos, limitando o valor da sobretensão. Conforme a referência [8, 9], esse dispositivo apresentava alguns pontos negativos na sua utilização, como forte influência das condições atmosféricas em suas características de operação e a rápida degradação dos centelhadores devido à elevada corrente que passava na ruptura. Além disso, quando atuavam, os centelhadores proporcionavam curto-circuito, sendo necessária a atuação de um mecanismo de proteção para a extinção do arco elétrico.

O segundo tipo de para-raios, criado com o objetivo de se evitar o estabelecimento do curto-circuito, consistia na associação série de um resistor não-linear com um centelhador. Utilizados normalmente em redes de distribuição, sua corrente de descarga somente era interrompida quando a tensão passava por zero. Vários tipos de resistores não-lineares foram utilizados, como hidróxido de alumínio, óxido de ferro e sulfeto de chumbo [8]. Esses varistores possuíam resistências elevadas, acarretando numa elevada tensão residual sobre os para-raios [7].

Com o aumento nos níveis de tensão dos sistemas elétricos, foi necessário o desenvolvimento de para-raios com “gap” ativo. Neste estágio, o varistor utilizado era de carboneto de silício (SiC). Este tipo de para-raios está sendo utilizado ainda hoje nos sistemas elétricos mais antigos.

O funcionamento dos centelhadores ativos consistia no alongamento do arco através do “gap” com o auxílio de um campo magnético [7]. Com isso, os projetos de centelhadores foram ficando mais complexos, e a sua presença na montagem dos para-raios tornou-se indesejável. Dentre os problemas com a montagem dos centelhadores, citam-se a ocorrência de erros de montagem e dispersões nos valores de tensão de ruptura [8].

O quarto e atual estágio de desenvolvimento de para-raios consiste na utilização apenas de blocos de resistores não-lineares. O material empregado é o óxido de zinco (ZnO), que apresenta uma característica não-linear muito superior à do SiC [7]. A Figura 3 apresenta a comparação entre as curvas características dos para-raios com varistores de ZnO (para várias temperaturas) e com varistores de SiC.

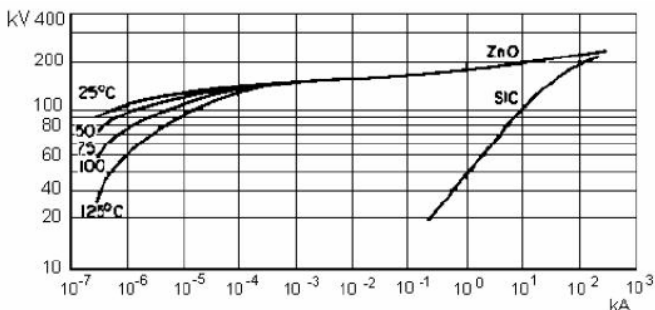


Figura 3 - Curvas características de para-raios com varistores de ZnO e SiC [8]

Os primeiros para-raios de ZnO produzidos comercialmente apresentavam centelhadores em paralelo com uma pequena percentagem dos discos do varistor [7, 8]. Atualmente, devido à alta não-linearidade dos varistores de ZnO, é possível a obtenção de níveis de proteção adequados sem a utilização dos centelhadores, tornando os projetos de para-raios mais simplificados. Diferentemente dos para-raios de SiC, os de ZnO permitem uma corrente de fuga de baixa intensidade quando sob

tensão nominal, não sendo suficiente para provocar aquecimento prejudicial ao para-raios.

A Figura 4 apresenta a evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões nos sistemas de potência. A Figura 4a representa a primeira geração de para-raios, com apenas os centelhadores. A Figura 4b apresenta a segunda geração, com um resistor não-linear em série com o centelhador. A Figura 4c apresenta o para-raios com “gap” ativo e varistores de SiC. A Figura 4d apresenta o estágio atual, com apenas o bloco de varistor de ZnO.

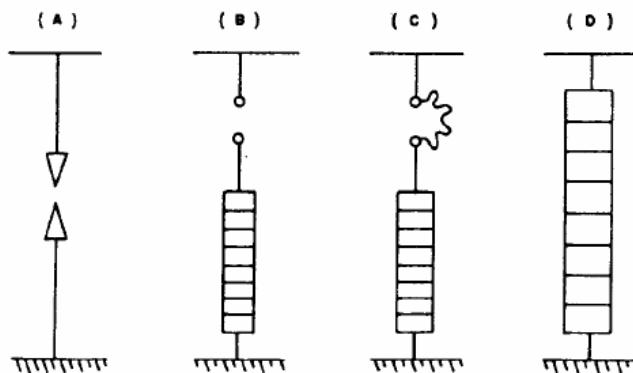


Figura 4 - Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensão [7]

A tendência atual está voltada para o projeto e utilização de para-raios de ZnO sem centelhadores [7, 8]. No Brasil, embora grande parte dos para-raios em subestações ainda seja de SiC, as empresas concessionárias de energia têm adquirido para-raios de ZnO para as novas instalações e substituição dos equipamentos antigos, quando necessário.

2.3. Para-raios de ZnO

2.3.1. Características construtivas

Os para-raios de ZnO são equipamentos de estrutura simples. No caso mais comum, sem a presença de centelhadores, consistem basicamente em uma coluna de blocos de varistores de ZnO, responsável pela limitação das sobretensões, envolvida por um

invólucro externo, responsável pela proteção mecânica, isolamento e estanqueidade dos componentes internos. Existem atualmente dois tipos de invólucro, de porcelana ou polimérico, sendo cada um com diferentes concepções de montagem.

Os varistores de ZnO são os principais componentes dos para-raios. Seu formato geralmente é cilíndrico, com o diâmetro escolhido de acordo com a capacidade de absorção de energia desejada para o equipamento [13]. As características dos materiais utilizados nestes varistores dependem da sua estrutura, sendo também dependentes da sua composição química e de seu tratamento térmico.

Para a montagem do para-raios com invólucro de porcelana, de um modo geral, os varistores são mantidos de forma concêntrica, de modo a minimizar efeitos de distribuição não uniforme de campo elétrico e ionização interna [4, 8]. Para evitar explosão violenta do invólucro no caso de falha, são utilizados mecanismos de alívio de sobrepressão.

O surgimento dos para-raios de ZnO com invólucro polimérico, acarretou em mudanças nas características mecânicas do para-raios. Atualmente, existem duas concepções de projetos de para-raios poliméricos. A primeira é equivalente aos projetos de para-raios com invólucro de porcelana, sendo primeiro feito o molde externo e então inserido o conjunto de blocos de ZnO. É normalmente colocado um tubo de fibra de vidro entre os blocos de varistores e o invólucro polimérico, aumentando a resistência mecânica do dispositivo. Este tipo de projeto também apresenta um espaçamento interno de ar, entre o polímero e os varistores, sendo necessária a utilização de dispositivos de alívio de sobrepressão. Na segunda concepção de projeto, mais utilizada, o invólucro é injetado diretamente sobre o conjunto de blocos de ZnO, eliminando quase totalmente a possibilidade de penetração de umidade [4, 8].

A Figura 5 mostra exemplos de para-raios, sendo um com invólucro de porcelana e outro com invólucro polimérico.

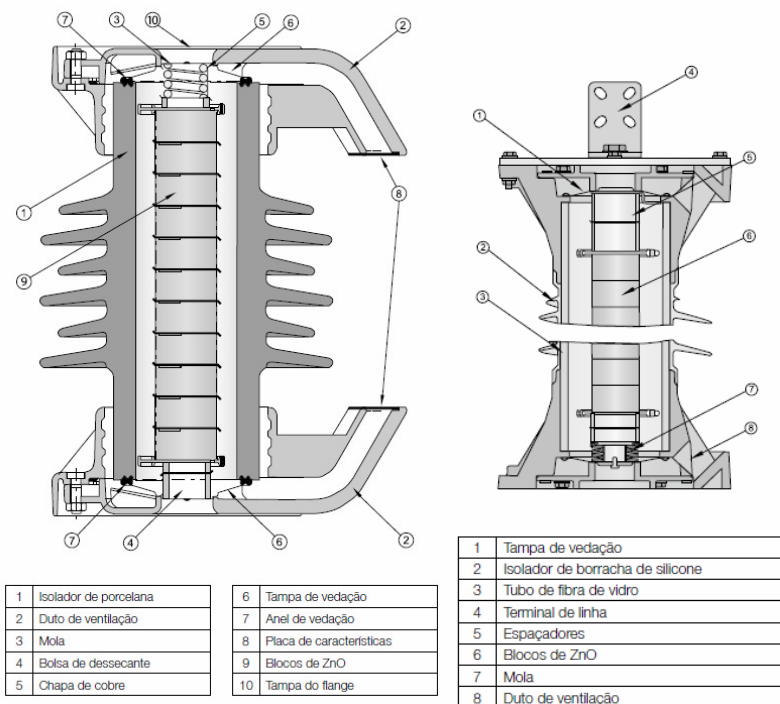


Figura 5 - Para-raios de ZnO com invólucro de porcelana (esquerda) e polimérico (direita) – Catálogo ABB [14]

Em sistemas que requerem maior capacidade de absorção de energia, alguns fabricantes vêm optando pela montagem de para-raios multi-coluna. Esta montagem consiste em colocar conjuntos de varistores de ZnO em paralelo, que podem estar em um mesmo invólucro ou separados. Para ambas as construções, cuidados especiais devem ser tomados, para que a repartição de corrente seja a mais uniforme possível [4, 8].

2.3.2. Corrente de fuga

De maneira simplificada, um para-raios de ZnO pode ser modelado como uma resistência não-linear, representando os blocos de ZnO, em paralelo com uma capacitância, função da estrutura do para-raios. A Figura 6 mostra o circuito equivalente simplificado do para-raios.

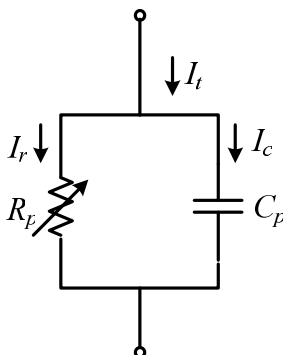


Figura 6 - Circuito equivalente simplificado do para-raios [15]

O circuito apresentado é constituído por um resistor não-linear (R_p), representando os blocos de ZnO, e um capacitor (C_p), representando as capacitâncias do pára-raios.

Ao ser aplicada uma tensão sobre os terminais do para-raios, a corrente de fuga total (I_t) circula por ele. Esta corrente representa a soma de duas componentes, sendo uma resistiva e não-linear (I_r) e a outra capacitiva e linear (I_c). Usualmente, para um para-raios em bom estado, a componente resistiva está entre 5% e 20% do valor da corrente total [16]. A deterioração nas propriedades do para-raios irá acarretar em um aumento na componente resistiva da corrente de fuga, de modo que seu monitoramento pode indicar o estado de degradação de um para-raios de ZnO.

Embora se possam encontrar outras modelagens de para-raios ZnO na literatura [3, 17], neste trabalho será utilizado o modelo apresentado na Figura 6.

2.3.3. Especificações do para-raios

A seguir, descrevem-se alguns dos principais termos aplicados aos para-raios de ZnO sem centelhador encontrados na literatura [3, 4,8].

a) Tensão nominal

Valor máximo eficaz, em frequência industrial, para a qual o para-raios foi projetado a operar sem perder sua estabilidade térmica. É utilizado como parâmetro de referência para a especificação das características de proteção e operação.

b) Máxima tensão contínua de operação

Máxima tensão em frequência industrial que pode ser aplicada continuamente sobre o para-raios, sem que sejam alteradas suas propriedades.

c) Capacidade de sobretensão temporária

Função da característica de suportabilidade “tensão x duração”, indicando a quantidade de tempo para a qual é permitida a aplicação de tensão superior à tensão máxima de operação contínua.

d) Corrente de referência

Valor de crista da componente resistiva da corrente na frequência industrial utilizada para definir sua tensão de referência. Estabelecido pelo fabricante.

e) Tensão de referência

Ponto de transição entre as regiões de baixas correntes e de alta não-linearidade. Valor eficaz da tensão que se estabelece nos terminais do para-raios quando se circula a corrente de referência.

f) Tensão residual

Máximo valor da tensão que se estabelece no para-raios quando este é atravessado por uma corrente de impulso. A tensão residual depende da forma de onda, amplitude e taxa de crescimento da corrente de impulso aplicada.

g) Capacidade de absorção de energia

Valor da maior quantidade de energia a que pode ser submetido o para-raios sem que sofra alterações significativas de suas características após o retorno às condições normais de operação. O para-raios deve garantir que essa energia seja dissipada eficientemente, evitando consequências sérias aos equipamentos do sistema elétrico e a si próprio.

2.4. Sobretensões

Embora os sistemas elétricos operem em sua maior parte em regime permanente, estão sujeitos a fenômenos transitórios envolvendo variações de corrente e tensão. De forma geral, os estudos realizados

para a obtenção de valores referentes aos fenômenos transitórios para a especificação de equipamentos do sistema elétrico são denominados “estudos de sobretensões” [7].

De acordo com a norma NBR 6939 [18], uma sobretensão U_s é definida como qualquer tensão entre fase e terra, ou entre fases, cujo valor de crista exceda o valor de crista deduzido da tensão de pico U_m do equipamento. Os valores para sobretensões entre fase e terra e entre fase e fase estão apresentados respectivamente em (2.1) e (2.2).

$$U_s > \frac{U_m \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

$$U_s > U_m \sqrt{2} \quad (2.2)$$

As sobretensões podem ser classificadas de acordo com a forma de onda e a duração, seu efeito sobre a isolação ou sobre o dispositivo de proteção.

A Figura 7 apresenta a representação das classes e as formas de onda das solicitações.

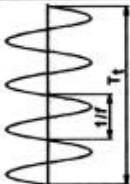

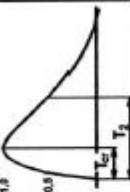
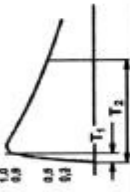
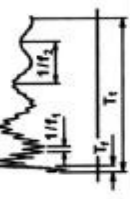
Classe	Baixa frequência		Frente lenta	Transitório	Frente muito rápida
	Contínua	Temporária			
Forma da tensão					
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz $T_1 \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_1 \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_{cr} > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_1 > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz T_1^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	*	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	*
*) A ser especificado pela norma do respectivo equipamento.					

Figura 7 - Classes e formas de onda das solicitações de tensão [19]

2.4.1. Sobretensões temporárias

São sobretensões de frequência fundamental de duração relativamente longa, podendo ser ou não fracamente amortecida, podendo também sua frequência ser várias vezes maior ou menor que a fundamental [18]. Podem ser originadas devido a faltas, operações de chaveamento, fenômenos não lineares ou combinações destes fenômenos [19].

2.4.2. Sobretensões transitórias

Sobretensões de curta duração (alguns milissegundos ou menos), podendo ser oscilatórias ou não, e usualmente fortemente amortecidas. As sobretensões transitórias podem ser classificadas em de frente lenta, frente rápida e frente muito rápida.

a) Sobretensões de frente lenta

São definidas como sobretensões transitórias usualmente unidirecionais, com tempo até a crista tal que $20\mu s \leq T_1 \leq 5000\mu s$ e tempo até o meio valor (na cauda) $T_2 \leq 20ms$ [18].

Normalmente, essas sobretensões têm origem em energização e religamento de linhas, aplicação e eliminação de faltas, rejeição de carga, energização de capacitores, chaveamento de correntes capacitivas e indutivas (manobras de reatores) e descargas atmosféricas no sistema em locais distantes do ponto considerado [19].

b) Sobretensões de frente rápida

São definidas como sobretensões transitórias usualmente unidirecionais, com tempo até a crista tal que $0,1\mu s \leq T_1 \leq 20\mu s$ e tempo até o meio valor (na cauda) $T_2 \leq 300\mu s$ [18].

Essas sobretensões têm origem em descargas atmosféricas diretamente nas linhas aéreas, em seus condutores fase, nos cabos para-raios, em estruturas próximas à linha considerada e em operações de manobra e faltas [19].

c) Sobretensões de frente muito rápida

São definidas como sobretensões transitórias usualmente unidirecionais, com tempo até a crista tal que $T_1 \leq 0,1\mu s$, duração total

menor ou igual a 3ms e oscilações superpostas de frequências entre 30kHz e 100MHz.

Ocorrem devido a operação de seccionadoras ou faltas dentro de subestações isoladas a SF₆ (GIS), devido à disrupção rápida da isolação gasosa e propagação praticamente não amortecida do surto [19].

2.4.3. Sobretensão combinada

Consiste em duas componentes de tensão simultaneamente aplicadas entre cada um dos terminais de uma isolação fase-fase e a terra. É classificada pela componente de maior valor de crista. Pode ter qualquer origem citada anteriormente para as outras sobretensões.

2.4.4. Descargas atmosféricas

A principal causa de desligamentos não programados ocorridos em redes de distribuição, correspondendo a uma faixa de 30% a 60% dos desligamentos, é a ocorrência de descargas atmosféricas [1].

São caracterizadas por frentes de onda menores que 20μs e tempo de cauda da ordem de 50μs. São consideradas descargas atmosféricas sobretensões fase-terra ou fase-fase devido a impulsos atmosféricos ou outro fenômeno cuja forma de onda seja similar a esta [7, 17].

2.5. Fatores de degradação de para-raios

A degradação dos para-raios de ZnO pode ocorrer devido a fatores tanto de natureza elétrica e térmica quanto de fatores externos e ambientais, modificando a condição de operação do equipamento. Essas alterações podem causar problemas para o próprio para-raios, levando o equipamento à disrupção na tensão operativa do sistema e ao aumento da corrente de fuga que passa por ele, podendo resultar em explosão ou queima e, conseqüentemente, causar danos ao sistema elétrico. A seguir estão descritos alguns fatores que podem causar a degradação de para-raios de ZnO.

2.5.1. Perda da estanqueidade e penetração da umidade

É considerada a principal causa de falha em para-raios. A umidade se infiltra através de trincas no invólucro do para-raios ou da deterioração do sistema de vedação e/ou dos dispositivos de alívio de sobrepressão.

Com a penetração da umidade, pode haver a corrosão dos componentes metálicos. Ainda, devido à absorção de umidade pelos blocos de ZnO, a curva $V \times I_r$ pode ser alterada, aumentando a corrente resistiva de fuga e alterando os níveis de proteção, comprometendo o isolamento externo e reduzindo a capacidade de absorção de energia do equipamento [20].

2.5.2. Contaminação externa

Com o depósito de materiais contaminantes, como umidade e poeira, ao longo do invólucro do para-raios, há uma alteração na distribuição da tensão, com consequente aquecimento do para-raios. A contaminação gera também ionização interna, através de descargas internas que produzem alterações irreversíveis na composição do gás interno devido a reações químicas, queima de oxigênio e a formação de compostos químicos. A ausência do oxigênio e os novos gases gerados pelas descargas causam o envelhecimento dos blocos de ZnO, aumentando a corrente resistiva de fuga, o que pode conduzir à instabilidade térmica do para-raios e sua falha [3, 4, 20].

2.5.3. Descargas internas

As descargas internas que podem ocorrer no para-raios devido ao efeito corona originam gases que podem prejudicar as propriedades químicas e dielétricas do material que recobre os blocos de ZnO. Com isso, há o desvio de correntes para a superfície dos varistores, evitando a sua atuação na limitação e eliminação das correntes subsequentes aos disparos para surtos de tensão [20].

2.5.4. Descargas de longa duração ou de alta intensidade com curta duração

As descargas de longa duração podem ocorrer com o chaveamento de grandes bancos de capacitores ou de linhas longas em vazio, ocasionando em queimas ou rachaduras dos varistores [20].

Os impulsos de alta intensidade e curta duração podem ocorrer se concentrando em um único ponto, podendo perfurar os blocos de ZnO [20].

Esta forma de degradação também pode provocar uma redução na máxima temperatura para o qual o varistor tem capacidade de dissipar energia, podendo ocorrer instabilidade térmica no caso de a energia absorvida ser maior que a capacidade de dissipação dos varistores [4].

2.6. Técnicas para a avaliação de para-raios de ZnO

Quando o para-raios não está sujeito à sobretensão, é esperado seu comportamento similar a um isolador. As propriedades isolantes deste equipamento são essenciais para a sua longevidade e, conseqüentemente, para a confiabilidade do sistema elétrico [15].

Para prevenir problemas que possam causar danos ao sistema de energia, aumentando a confiabilidade do sistema e diminuindo custos com manutenção de equipamentos protegidos pelos para-raios, podem ser utilizadas técnicas para a inspeção das condições destes equipamentos, avaliando seu estado.

Com a degradação do equipamento, há um aumento na corrente de fuga, sobretudo na componente resistiva, além de um aumento de sua temperatura.

Em geral, os métodos para se avaliar o estado do para-raios estão associados ao valor, forma de onda ou aquecimento provocado pela corrente de fuga [3], sendo as principais técnicas utilizadas a da medição da corrente de fuga e a termovisão [8].

Por serem equipamentos de grande importância para o contínuo funcionamento do sistema elétrico, é importante que seu nível de degradação seja avaliado constantemente.

Apesar de existirem diversas técnicas para a avaliação do para-raios, não há um consenso sobre qual a melhor a ser utilizada, tendo cada uma suas vantagens e desvantagens.

Embora esta dissertação seja focada no método da corrente de fuga, convém conhecer também os outros métodos de avaliação utilizados. Nesta seção serão comentadas brevemente algumas técnicas aplicadas na inspeção do estado de degradação de para-raios de ZnO.

2.6.1. Medição da resistência de isolamento

A medição da resistência de isolamento é uma técnica utilizada há muito tempo, embora não exista um consenso quanto a sua validade como meio para diagnóstico [3].

Através da utilização de megaôhmetros, o estado do para-raios é avaliado pela comparação do resultado com o de ensaios de aceitação, valores típicos de para-raios similares ou comparação com valores de outras unidades.

Uma desvantagem desta técnica é o fato de ser *off-line*, ou seja, há a necessidade da retirada do para-raios para a inspeção.

2.6.2. Medição de perdas dielétricas

Para a execução desta técnica é utilizado um equipamento que realize a medição do fator de potência (as perdas dielétricas). Assim, a avaliação é realizada através de comparações com dados já existentes de para-raios novos e de mesmas características elétricas [3].

Da mesma forma que a medição da resistência de isolamento, este método não é um consenso devido à forma com que os resultados são avaliados [3].

2.6.3. Contador de descargas

Consiste em utilizar um instrumento que conte a quantidade de descargas a que o para-raios foi submetido para saber seu número de atuações. Porém, caso as descargas ocorram em um pequeno intervalo de tempo (abaixo de 50ms), os instrumentos podem não registrar corretamente a quantidade [3, 15].

Os contadores de descarga operam com impulsos de certas amplitudes, ou acima de certas combinações de amplitude e duração [21].

A maioria dos contadores não fornece informações específicas sobre o estado do para-raios. Porém, suas informações podem auxiliar no diagnóstico das condições do equipamento, assim como indicar sobretensões ocorrendo no sistema [3, 15].

2.6.4. Termografia

A inspeção termográfica é uma técnica bastante utilizada para o diagnóstico de diversos equipamentos. Consiste na medição da temperatura do corpo do para-raios, detectando as partes aquecidas (pontos quentes) e comparando os valores de temperatura máximos e mínimos. A técnica fornece um diagnóstico confiável, sem interferir no funcionamento do dispositivo, não sendo necessária a retirada de operação do para-raios [3, 8, 21]. A maior dificuldade deste método consiste na determinação precisa do valor de temperatura a partir do qual o para-raios pode ser considerado defeituoso [21].

Apesar de a técnica apresentar também bons resultados mesmo sofrendo interferência da luz do sol ou qualquer outra fonte externa [21], recomenda-se que as leituras sejam realizadas durante períodos de menor insolação ou durante a noite [3, 21]. A incidência da radiação solar ou de qualquer outra fonte de calor externa sobre as partes metálicas do para-raios, pode induzir a erro de avaliação do mesmo.

A Figura 8 apresenta dois exemplos de termogramas, um para um para-raios em condições normais e outro para o equipamento defeituoso.

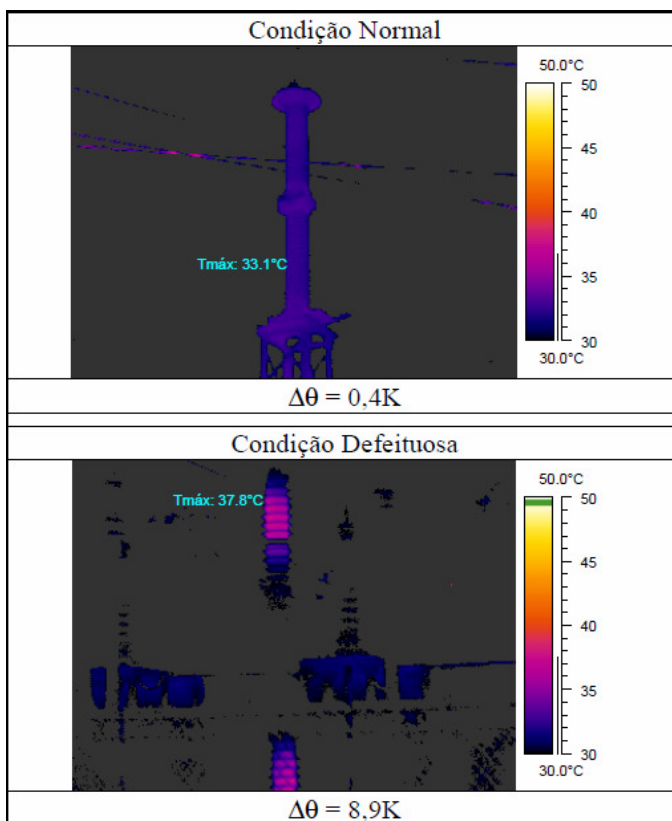


Figura 8 - Exemplos de termogramas de a) Para-raios em condição normal e b) Para-raios em condição defeituosa [22]

O método da análise térmica tem uma relação direta com o método da medição de corrente de fuga. Com o envelhecimento dos blocos de ZnO, há o aumento da corrente resistiva que atravessa os varistores, causando uma maior perda por efeito Joule. Com isso, podem-se observar os pontos quentes [21].

Algumas companhias utilizam a técnica da termografia e, quando detectado um para-raios possivelmente defeituoso, é aplicada a técnica da medição da corrente de fuga. Algumas empresas também têm como sistemática realizar a inspeção termográfica em pelo menos três ângulos

distintos de um mesmo para-raios, aumentando a segurança dos resultados [3].

2.6.5. Medição da corrente de fuga

A técnica de medição da corrente de fuga consiste na medição da corrente que flui através do para-raios quando este está energizado pela tensão fase-terra nominal do sistema [21]. As medições de corrente de fuga podem ser feitas tanto com o para-raios energizado na rede, através de instrumentos de medição portáteis, quanto desligado da rede, em laboratório.

Qualquer deterioração das propriedades isolantes do para-raios afeta diretamente a parcela resistiva da corrente, causando o seu aumento [15, 23]. Com a degradação do para-raios, há também o aumento de suas componentes harmônicas, principalmente da terceira harmônica. A Figura 9, retirada de [3], apresenta as curvas das correntes resistivas de fuga para dois casos de varistores de ZnO, sendo um com o equipamento em condição normal de operação e outra com o equipamento degradado.

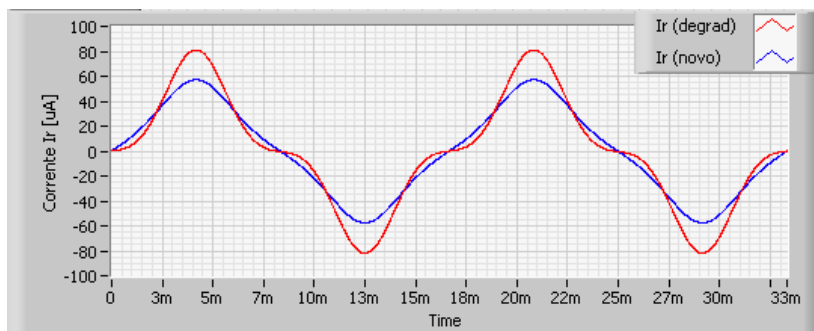


Figura 9 - Corrente de fuga para um mesmo para-raios quando novo e degradado [3]

Existem diversas técnicas para a medição da corrente de fuga, sejam elas através da medição da corrente total, apenas da parcela resistiva da corrente de fuga ou apenas da componente de terceira harmônica da corrente. Esses métodos, assim como mais detalhes sobre a técnica da medição da corrente de fuga, serão apresentados no capítulo 3.

2.7. Considerações gerais

Os para-raios são equipamentos utilizados para manter a confiabilidade do sistema elétrico e para a proteção de outros equipamentos de maior custo. Idealmente, o dispositivo deve apresentar impedância infinita sob tensão normal e, na ocorrência de uma sobretensão, entrar em condução instantaneamente, mantendo a tensão sobre o equipamento que protege no nível seguro para sua operação.

Nos primeiros estágios de evolução do para-raios, era indispensável a utilização de centelhadores. Com o desenvolvimento dos resistores não-lineares de óxido de zinco (ZnO), com corrente de fuga relativamente baixa, permitiu que os para-raios fossem construídos apenas de blocos dos varistores, sem necessidade de centelhador.

A degradação do para-raios pode ocorrer devido a diversos fatores, tanto de natureza elétrica quanto térmica e pela ação do tempo. Essas alterações acarretam em aumento da corrente resistiva de fuga que passa por ele, podendo levar o equipamento à disrupção sob a tensão operativa e causar explosão ou sua queima.

Sendo este um importante equipamento para o sistema elétrico, é necessária a sua constante avaliação, de modo que se evitem maiores danos. Existem diversas técnicas de inspeção de para-raios, sendo as principais a inspeção termográfica e a inspeção através da corrente de fuga.

No capítulo 3 será apresentada com maiores detalhes a avaliação do para-raios através da corrente de fuga. Serão apresentadas as propriedades desta corrente, suas componentes e métodos para se fazer a medição.

3. Inspeção de para-raios ZnO através da avaliação da corrente de fuga

3.1. Introdução

Quando em operação, mesmo sob tensão nominal, o para-raios de ZnO apresenta uma corrente de fuga que o atravessa em direção à malha de terra da subestação. Esta corrente pode ser dividida em duas componentes, sendo uma capacitiva linear e outra resistiva não-linear. A degradação do para-raios causa o aumento da componente resistiva desta corrente e, conseqüentemente, da perda de potência ativa. O aumento da corrente de fuga que atravessa o para-raios pode resultar em explosão ou queima do equipamento, causando grande risco aos operadores e também ao sistema elétrico. Desta maneira, é necessária a avaliação periódica do estado operacional do equipamento.

O método de avaliação de para-raios através da corrente de fuga se baseia na medição da corrente que atravessa o para-raios e flui pelo cabo de aterramento. Através do valor medido, pode-se avaliar o estado do para-raios.

Diversas técnicas para a avaliação da corrente de fuga, algumas delas utilizadas em instrumentos comerciais, podem ser encontradas na literatura [15, 16]. Neste capítulo apresentam-se as principais características da corrente de fuga dos para-raios de ZnO, assim como os principais métodos utilizados na sua medição para a avaliação do equipamento.

3.2. Medição da corrente de fuga

De acordo com a norma IEC 60099-4 [23], o pico da corrente resistiva de fuga é fortemente influenciado pela estabilidade da tensão e por alterações na temperatura ambiente. Adicionalmente, a norma IEC 60099-5 [16] cita que qualquer deterioração nas propriedades isolantes dos varistores do para-raios de óxido de zinco acarretará no aumento da componente resistiva da corrente de fuga e, conseqüentemente, da energia dissipada pelo equipamento, quando mantidas a tensão e a temperatura externas.

Os procedimentos de medição da corrente de fuga podem ser divididos em dois grupos: medição *on-line*, quando o para-raios está conectado ao sistema e energizado com a tensão de operação normal, e medição *off-line*, quando o para-raios é desconectado do sistema e é

energizado com uma fonte independente de tensão no local ou em laboratório.

As medições *off-line* podem ser realizadas através do uso de fontes especialmente modificadas para o propósito, como geradores de teste móveis de corrente alternada ou contínua. O uso de métodos *off-line* permite boa precisão nos resultados, desde que uma tensão suficientemente alta seja utilizada. Como desvantagens, podem ser citadas o custo dos equipamentos envolvidos e a necessidade de se desconectar o para-raios do sistema.

A realização de medições *on-line* sob tensão normal de serviço é o método mais comum, por permitir a realização dos testes sem a desconexão do para-raios da rede. Por motivos práticos e por segurança, a corrente de fuga é normalmente medida no cabo de aterramento do para-raios. Para isso, o para-raios deve ser equipado com um terminal de terra isolado.

Em geral, a medição de corrente de fuga *on-line* pode ser realizada através de instrumentos de medição portáteis ou fixos. Os instrumentos portáteis são normalmente conectados ao terminal de aterramento do para-raios através de sondas do tipo alicate de corrente. Já os instrumentos de medição fixos utilizam transformadores de corrente. Se mudanças significativas nas condições operativas do para-raios forem observadas, podem ser necessárias investigações mais detalhadas, durante algum de tempo.

3.3. Propriedades da corrente de fuga de varistores de ZnO

A corrente de fuga de um para-raios de ZnO é composta por duas componentes, uma resistiva não-linear e outra capacitiva linear, sendo a corrente total a soma das duas. A parcela resistiva da corrente de fuga é a responsável pelas perdas e pode indicar o grau de degradação dos blocos de ZnO. Esta parcela representa apenas de 5% a 20% do valor da corrente de fuga total de um para-raios em condições normais de operação, aumentando com o estado de degradação do equipamento.

A Figura 10 apresenta a forma de onda da corrente de fuga total através de uma medição típica realizada em laboratório para um único bloco de varistor de óxido de zinco, encontrada na literatura [16]. Na figura também é apresentada a forma de onda da tensão U_c , equivalente à sua tensão de operação contínua, à qual o varistor foi submetido. Através da medição simultânea de corrente e tensão, pode se efetuar a comparação temporal entre os sinais, tornando possível determinar o

valor da componente resistiva. Quando a tensão atinge o valor máximo ($dU/dt=0$), a amplitude da componente capacitiva é nula, e o valor instantâneo da corrente de fuga total corresponde ao valor de pico da componente resistiva.

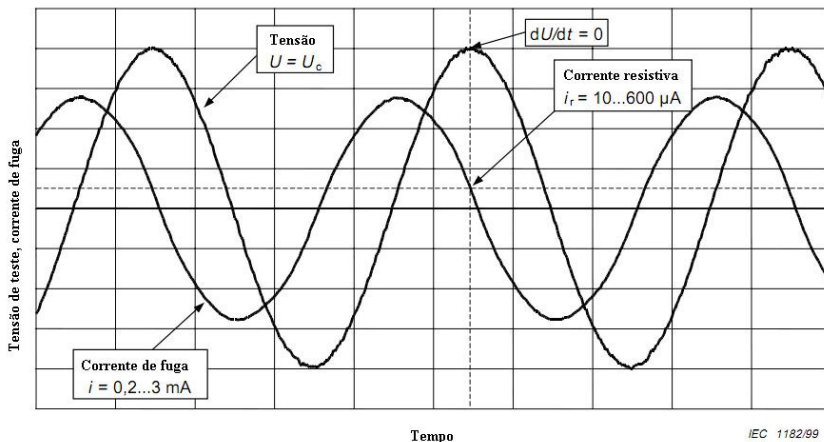


Figura 10 - Corrente de fuga típica para um varistor de ZnO para condições de laboratório [17]

3.3.1. Corrente de fuga capacitiva

A componente capacitiva da corrente de fuga de um para-raios de ZnO ocorre devido à permissividade dos varistores de óxido de zinco, às capacitâncias parasitas e, quando aplicável, por capacitores de equalização. A capacitância específica de um bloco varistor varia tipicamente de 60 a 150 pF.kV/cm², resultando em um pico de aproximadamente de 0,2 a 3mA em condições normais de serviço [16]. A menos da existência de harmônicos na tensão da rede, esta componente de corrente é linear.

Não há evidências de que a corrente capacitiva varie significativamente com a deterioração dos blocos varistores [16]. Desta maneira e devido ao fato de, para os para-raios em condições normais de operação, esta ser a sua componente predominante, pode-se dizer que a corrente de fuga total não indica de forma confiável a condição do equipamento [16].

3.3.2. Corrente de fuga resistiva

Para dados valores de tensão e temperatura, a componente resistiva da corrente de fuga é um indicador sensível das variações na característica tensão-corrente de varistores de óxido de zinco. Portanto, o valor da parcela resistiva da corrente pode ser utilizada como uma ferramenta de indicação para o diagnóstico de um para-raios de óxido de zinco [16].

Conforme já exposto, o valor da componente resistiva depende da temperatura ambiente e do valor da tensão aplicada sobre o para-raios. As Figuras 11 e 12 apresentam a dependência da corrente resistiva de fuga com relação a, respectivamente, tensão e temperatura, conforme a norma IEC 60099-5 [16], normalizadas para a tensão contínua de operação U_c , que pode variar dependendo do para-raios, e para a temperatura de 20°C. Na figura também são apresentadas as curvas da dependência da corrente de terceiro harmônico e das perdas.

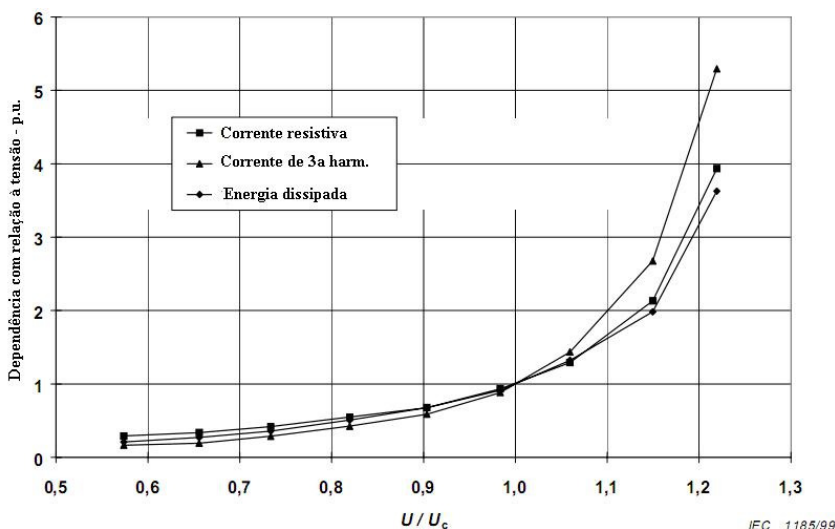


Figura 11 - Dependência com relação à tensão para a temperatura de 20° C [16]

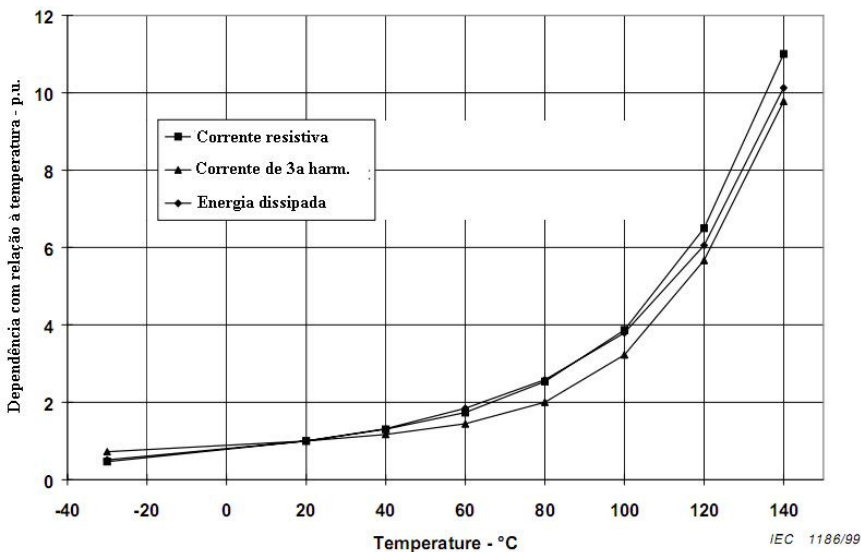


Figura 12 - Dependência com relação à temperatura para a tensão U_c
[16]

3.3.3. Harmônicas na corrente de fuga total

Devido à não-linearidade dos blocos de ZnO, a componente resistiva da corrente de fuga dá origem a componentes harmônicas, mesmo quando o para-raios está alimentado em tensão senoidal. Desta maneira, por ser uma soma das componentes resistiva e capacitiva, a corrente total de fuga apresenta distorção harmônica.

O conteúdo harmônico presente na forma de onda da corrente, quando o para-raios está operando sob tensão sem distorção harmônica, é função apenas da corrente resistiva, também apresentando em seu valor dependência com relação à tensão e temperatura. Tipicamente, em um para-raios em condições normais de operação, a componente de terceira harmônica está entre 10% e 40% do valor da corrente resistiva. Com a degradação do para-raios e o consequente aumento da corrente resistiva de fuga, há também o aumento das componentes harmônicas, de modo que estas também possam ser usadas como indicativo do estado do para-raios [16].

A presença de harmônicos na forma de onda da tensão da rede pode influenciar consideravelmente nas componentes da corrente de fuga total. Neste caso, as harmônicas geradas na parcela capacitiva

também devem ser levadas em conta, e o conteúdo harmônico na corrente de fuga total não é mais um indicativo da corrente resistiva de fuga ou do estado de operação do para-raios.

3.3.4. Energia dissipada

A energia dissipada depende diretamente da corrente resistiva de fuga, sendo que seu valor também pode ser usado como indicador do diagnóstico do estado do para-raios. Valores típicos da energia dissipada por para-raios energizados por uma tensão em seu valor de operação contínua e 20°C estão entre 5mW/kV e 300mW/kV. A energia dissipada sofre influência também da temperatura ambiente e da amplitude de tensão em que o para-raios está energizado [16].

3.3.5. Corrente de fuga superficial

No caso de chuva ou condições alta umidade combinada com a poluição na superfície do para-raios, pode haver a passagem de uma corrente de fuga superficial em seu encapsulamento, podendo interferir na medição. A corrente superficial externa pode ser minimizada de acordo com as condições climáticas.

3.4. Medição da corrente de fuga total

A corrente total é predominantemente capacitiva, apresentando como componente resistiva uma fração muito pequena. Adicionalmente, as componentes resistiva e capacitiva têm uma diferença de fase de 90° entre si, sendo necessário um grande aumento na componente resistiva antes que uma mudança perceptível na corrente de fuga total ocorra. A corrente de fuga total é também sensível à instalação física do para-raios, uma vez que a corrente capacitiva depende das capacitâncias parasitas envolvidas. A Figura 13 apresenta a variação percentual da corrente total em relação à variação da componente resistiva. Nesta análise, observa-se que, mesmo com um incremento de 400% na componente resistiva da corrente de fuga, há pouca influência no valor da corrente total, que aumenta em torno de apenas 5%.

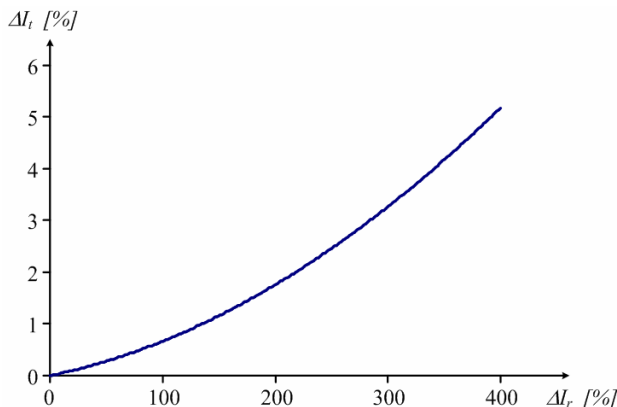


Figura 13 - Relação entre a variação das correntes de fuga resistiva e total [3]

Em geral, a medição da corrente de fuga total *on-line* é realizada através de miliamperímetros integrados aos contadores de surtos instalados na base do para-raios ou de instrumentos portáteis. Os instrumentos podem fornecer leituras de valor eficaz, médio ou de pico da corrente de fuga total. Devido à baixa sensibilidade desta corrente para com a mudança no valor da componente resistiva, este método de medição é inadequado para a avaliação do estado operacional do para-raios.

3.5. Medição da corrente resistiva ou energia dissipada

Para o método de avaliação do para-raios através da corrente de fuga, a determinação direta da componente resistiva é a forma mais eficiente de monitoramento [3]. Esta componente pode ser medida através de diferentes métodos. A norma IEC 60099-5 [16] cita alguns através da medição direta da corrente resistiva de fuga, da análise harmônica e da determinação direta da energia dissipada. Cada técnica de medição possui vantagens e desvantagens, variando de acordo com o local onde será feito o ensaio (subestação ou laboratório) e os instrumentos de medição disponíveis.

3.5.1. Medição direta da corrente de fuga resistiva

a) Usando um sinal de tensão como referência

Para este método é utilizado um sinal de referência representando a tensão sobre o para-raios. No instante em que a tensão está em seu pico ($dU/dt = 0$), o sinal de referência pode ser usado para leitura direta da componente resistiva da corrente de fuga. O nível da tensão e da corrente resistiva pode ser lido com um osciloscópio ou um dispositivo similar. Este método é comumente usado em laboratório para determinação precisa da corrente resistiva, pois o sinal de referência é de fácil acesso através de um divisor de tensão, desde que a forma de onda resultante possua uma diferença de fase suficientemente pequena.

Caso existam componentes harmônicas na tensão, a precisão do método é prejudicada. Além disto, há a necessidade de um sinal de referência, o que pode ser de difícil obtenção. A precisão do método pode também ser reduzida devido à corrente capacitiva induzida no terminal de terra do para-raios por fases ou módulos adjacentes.

b) Compensação da componente capacitiva

Dois métodos podem ser utilizados para a compensação da componente capacitiva, sendo um através do uso de um sinal de tensão e outro sem a necessidade deste sinal. Através da compensação da componente capacitiva da corrente de fuga, a sensibilidade para a medição da componente resistiva pode ser consideravelmente aumentada.

Para o método da utilização de um sinal de tensão, o princípio básico é uma ponte HV, onde é ajustado o braço capacitivo-resistivo para balancear a componente capacitiva da corrente de fuga, de modo que apenas a corrente resistiva seja averiguada na saída. Como desvantagem deste método, pode-se citar a necessidade de uma tensão de referência.

A técnica da compensação da componente capacitiva sem o uso do sinal de tensão consiste em criar um sinal de referência na frequência fundamental através de informações derivadas da corrente de fuga. Através de ajustes de amplitude e ângulo de fase, o sinal pode ser gerado de forma a compensar a componente capacitiva de fuga. Um problema deste método é a possível existência de harmônicos na tensão, gerando harmônicos na corrente capacitiva que podem interferir no resultado.

Ambas as técnicas possuem também um problema de exatidão, pois, como a capacitância do para-raios depende da tensão a que está submetido, a corrente obtida na saída não será somente a componente resistiva, tendo também uma parcela capacitiva.

Na norma IEC 60099-5 [16] é citada também outra maneira de compensação da corrente capacitiva, através da combinação das correntes de fuga das três fases. O método consiste em somar as correntes de fuga dos três para-raios na suposição de que, neste caso, as componentes capacitivas se cancelarão. A corrente resultante da soma é composta apenas pelos harmônicos das correntes resistivas dos para-raios. Havendo aumento na corrente resistiva, este aumento irá aparecer na corrente somada. As desvantagens desta técnica estão no fato de as correntes capacitivas dos para-raios normalmente serem diferentes pelo arranjo de montagem, e na sensibilidade com relação aos harmônicos da tensão da rede.

3.5.2. Determinação da corrente de fuga resistiva através da análise harmônica

a) Análise da harmônica de terceira ordem

O método se baseia no fato de que as harmônicas são criadas na corrente de fuga devido à característica não-linear tensão-corrente dos para-raios. A análise da terceira harmônica da corrente de fuga total pode ser feita diretamente através da transformada de Fourier, não sendo necessária tensão de referência. Para esta técnica, se assume que todas as harmônicas se originam da corrente resistiva, não havendo distorção harmônica na tensão da rede. O valor da terceira harmônica medida é então um indicativo da corrente resistiva e, da mesma maneira, varia com a tensão e temperatura ambiente.

Por ser a maior componente da corrente resistiva, a terceira harmônica é a mais usada como medida de diagnóstico. Normalmente, pode-se realizar a conversão de corrente de terceira harmônica para corrente resistiva através dos dados fornecidos pelo fabricante ou por medições em laboratório [16]. Normalmente, o fabricante do para-raios fornece apenas as curvas para correção da tensão e da temperatura para a corrente resistiva total, e não para a terceira harmônica. Desta maneira, através da conversão para corrente resistiva, podem ser feitas as correções com relação à tensão e temperatura, diminuindo possíveis incertezas na medição [24].

O método da análise harmônica sem compensação apresenta como principal desvantagem a sensibilidade com relação às harmônicas na tensão do sistema. Estas componentes podem criar correntes harmônicas capacitivas que se somam com as harmônicas geradas pela resistência não-linear, podendo o resultado apresentar erros consideráveis.

b) Análise da harmônica de terceira ordem com compensação das harmônicas de tensão

A metodologia da medição da terceira harmônica da corrente de fuga total com compensação das harmônicas de tensão é considerada a maneira mais confiável de avaliação do estado do para-raios. É baseado no mesmo princípio do método anterior, porém, ao se introduzir um sinal de corrente para a compensação da corrente capacitiva de terceira harmônica do para-raios, a sensibilidade ao conteúdo harmônico da tensão da rede é fortemente reduzida. A componente de terceiro harmônico da corrente capacitiva (I_{3c}) pode ser obtida indiretamente a partir da medição do campo elétrico, sendo utilizado para este método uma sonda de tensão posicionada normalmente na base do para-raios. Ao se obter esta componente, ela é subtraída da terceira harmônica da corrente total (I_{3t}), resultando apenas na componente de terceiro harmônico referente à corrente resistiva de fuga (I_{3r}), conforme apresentado em (3.1).

$$I_{3r} = I_{3t} - I_{3c} \quad (3.1)$$

As referências [21, 24] apresentam uma técnica utilizada para a realização desta compensação através de relações entre a corrente de fuga total medida e a corrente induzida na sonda de tensão do instrumento de medição.

Da mesma maneira que no método anterior, pode ser realizada a conversão para a corrente resistiva de fuga total do para-raios.

c) Análise da harmônica de primeira ordem

A referência [16] cita também a análise de harmônica de primeira ordem. Esta componente pode ser obtida através de filtragem e integração da corrente de fuga, resultando em um sinal proporcional à corrente resistiva. Desta maneira há pouca influência das harmônicas na

tensão do sistema. Sua principal desvantagem é a necessidade da obtenção de um sinal de tensão de referência.

3.5.3. Determinação direta da energia dissipada

A energia dissipada consiste na integral do produto do valor instantâneo da tensão e corrente de fuga multiplicado pelo tempo. Pode ser expressa em termos do produto do valor eficaz da corrente resistiva pela tensão eficaz sobre o para-raios. Devido aos processos de multiplicação e integração, diminui-se a influência das harmônicas da rede. Como desvantagem, pode-se citar a necessidade do sinal de tensão.

3.6. Correção da corrente resistiva

A corrente resistiva de fuga depende fortemente da temperatura e da amplitude de tensão a que o para-raios está submetido. Para um uso mais eficiente dos métodos de diagnóstico, pode ser necessária a correção do valor medido através de informações fornecidas pelo fabricante do para-raios.

A dependência da corrente de fuga com relação à tensão pode ser expressa como uma função da tensão de serviço dividida por uma tensão de referência (U_r). A dependência com relação à temperatura é dada em função da temperatura ambiente, apesar de não se saber exatamente a temperatura real dos varistores no momento da medição.

As Figuras 14 e 15 apresentam gráficos com valores padrões de multiplicadores para a correção da corrente resistiva com relação a tensão e temperatura, respectivamente. Observa-se que a tensão é normalizada para um valor de $0,70U_r$ e a temperatura, para 20°C . Embora as figuras apresentem valores típicos, eles podem mudar de acordo com o fabricante.

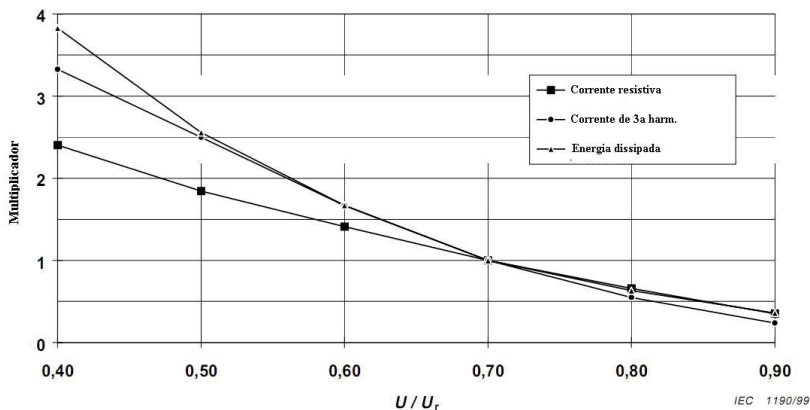


Figura 14 - Informação para correção de tensão operacional em serviço [16]

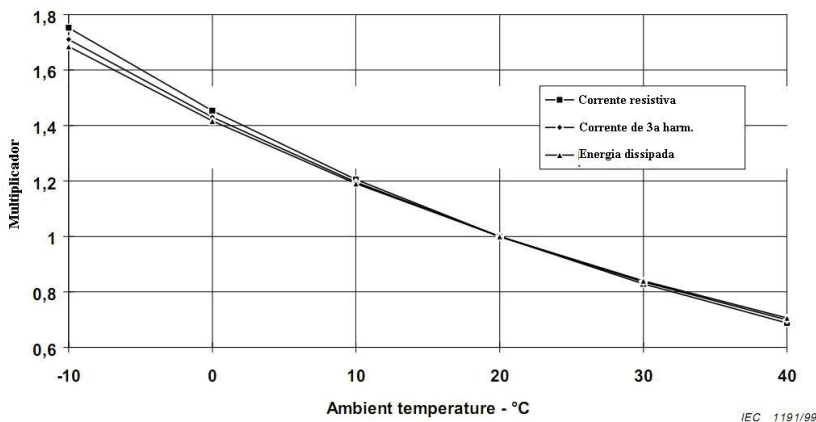


Figura 15 - Informação para correção de temperatura ambiente [16]

3.7. Sumário das técnicas de avaliação através da corrente de fuga

O grupo de trabalho GT10 do IEC apresentou uma síntese dos métodos de monitoramento e avaliação de para-raios. A sensibilidade, eficiência do diagnóstico e experiência em serviço dos métodos de medição de corrente de fuga é indicada na tabela 3.1 [3, 16].

Tabela 3.1 – Métodos de monitoramento que utilizam a medição de corrente de fuga

Método de monitoramento da corrente de fuga	Sensibilidade			Eficácia no diagnóstico		Experiência de serviço
	Harmônicos na tensão	Deslocamento de fase na medição da tensão ou corrente	Corrente superficial	Qualidade da informação	Complexidade de manuseio	
Fonte de tensão DC externa	NA ⁺	NA ⁺	Alta	Alta	Alta	Limitada
Tensão de referência	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
Compensação capacitiva	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
Compensação sintética	Média	Alta	Alta	Média	Baixa	SA*
Cancelamento da corrente capacitiva	Alta	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Limitada
Harmônica de 1ª ordem	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
Harmônica de 3ª ordem	Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Extensiva
Harmônica de 3ª ordem com compensação	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Extensiva
Medição das perdas	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	SA*

⁺NA – Não Aplicável

*SA – Sem Avaliação

3.8. Considerações gerais

O método da avaliação da corrente de fuga do para-raios de ZnO se baseia na medição da corrente que atravessa o equipamento e flui pelo cabo de aterramento. A deterioração das propriedades dos

varistores do para-raios acarreta no aumento da componente resistiva desta corrente, sendo assim, possível, determinar o estado do para-raios através de sua medição.

Pelo fato de a componente predominante na corrente de fuga total ser a capacitiva, que não se altera significativamente com a degradação do para-raios, a medição da corrente total torna-se ineficiente, sendo necessárias técnicas para a determinação de sua componente resistiva. Adicionalmente, caso não existam harmônicos na tensão da rede, as componentes harmônicas da corrente total também podem indicar o estado de degradação do para-raios.

Diversas técnicas podem ser encontradas na literatura para a medição da corrente resistiva de fuga, sendo a avaliação através da medição do harmônico de terceira ordem da corrente total com compensação da corrente capacitiva considerado o mais confiável.

Devido à alta dependência da corrente resistiva de fuga com relação à temperatura ambiente e à tensão da rede, recomenda-se também que seja feita a correção com relação a esses valores.

No próximo capítulo será apresentado um estudo da influência das componentes harmônicas da rede, da amplitude da tensão e da temperatura sobre as medições das correntes de fuga total, resistiva e das componentes harmônicas. Será também feita uma análise do aumento das correntes ao se comparar um para-raios em estado normal de operação com um para-raios degradado.

4. Análise da influência de harmônicos, temperatura, amplitude da tensão e degradação sobre a corrente de fuga

4.1. Introdução

Conforme exposto no capítulo anterior, a temperatura a que o para-raios está sujeito e a amplitude da tensão em que está operando influenciam no valor medido da corrente de fuga. Além disso, a presença de conteúdo harmônico na tensão da rede elétrica pode causar erros na medição, de modo que sua compensação seja teoricamente necessária.

Neste capítulo serão apresentadas simulações de para-raios quando energizados por uma tensão com conteúdo harmônico, analisando as diferenças nos valores de corrente de fuga obtidos. Também é realizada uma análise da influência da amplitude da tensão da rede e a temperatura e as mudanças nos valores das correntes de fuga de acordo com o estado de degradação do para-raios.

4.2. Análise da influência de harmônicos na tensão

A existência de harmônicos na forma de onda da tensão da rede influencia no resultado da medição da corrente de fuga do para-raios. O estudo foi realizado para se verificar como estas componentes influenciam na parcela resistiva da corrente de fuga e na corrente de fuga total.

Para este estudo, foi utilizado um instrumento virtual (VI) implementado no ambiente LabView a partir da modelagem de para-raios proposta por James Silveira [3], utilizando o modelo inverso. Este modelo foi desenvolvido a partir da função de Langevin, utilizada para representar as curvas BxH de materiais magnéticos. O modelo utiliza a curva VxIr do varistor como uma função de três parâmetros (a , U_m e β), conforme apresentado nas equações (4.1), (4.2) e (4.3), onde $i_{rm}(t)$ é a corrente resistiva modificada e $\Delta Z(t)$ representa a impedância diferencial do varistor. A Figura 16 apresenta o fluxograma do programa utilizado, retirado da tese de James Silveira [3].

$$i_{rm}(t) = i_r(t) + \beta u(t) \quad (4.1)$$

$$\Delta Z(t) = \frac{U_m}{a} \left[1 - \coth^2 \left(\frac{i_m(t)}{a} \right) + \left(\frac{a}{i_m(t)} \right)^2 \right] \quad (4.2)$$

$$i_r(t + \Delta t) = \Delta u(t) \left(\frac{1}{\Delta Z(t)} - \beta \right) + i_r(t) \quad (4.3)$$

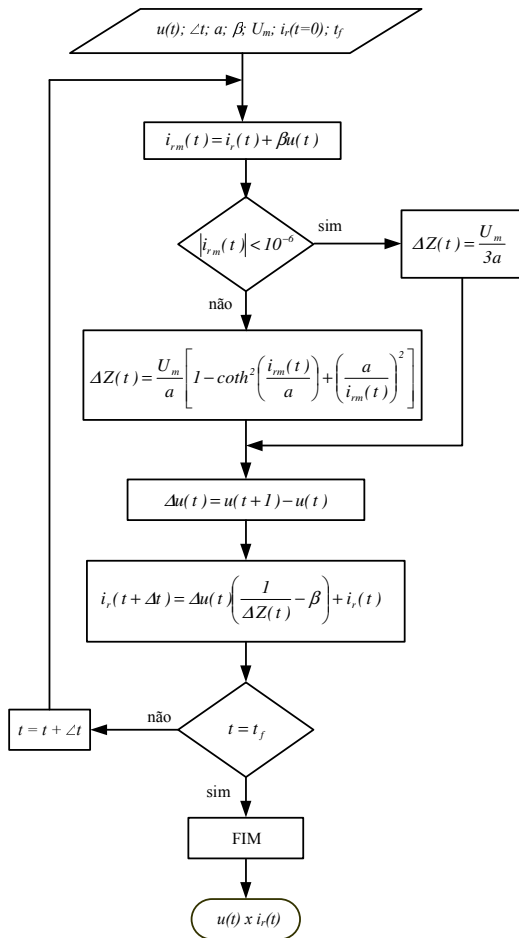


Figura 16 - Algoritmo numérico do modelo de varistor proposto por James Silveira [3]

A partir destes parâmetros, a forma de onda da corrente resistiva de fuga pode ser obtida e, após o tratamento da onda, as amplitudes de suas componentes harmônicas. Na simulação, foi utilizado um conjunto de parâmetros retirado da tese de James Silveira [3], que representam uma curva típica de varistor de para-raios. Os parâmetros estão apresentados abaixo:

$$a = 72,6722$$

$$U_m = 1,487931$$

$$\beta = 110,181$$

Para a realização das simulações, o VI foi modificado de modo a adicionar em paralelo uma representação da parcela capacitiva do para-raios. A capacitância utilizada foi de 10pF, valor típico de um para-raios de ZnO de 230kV. A tensão sobre o para-raios utilizada na simulação foi de 230kV de pico, em frequência de 60Hz.

O primeiro estudo realizado apresenta a influência dos harmônicos apenas sobre a corrente resistiva de fuga, comparando a curva e os valores obtidos para a simulação sem harmônicos na tensão da rede com a curva e valores obtidos com a existência de distorção. Nas comparações, foram adicionadas à forma de onda da tensão, em casos separados:

- 1% de 3º harmônico defasado em 180°;
- 5% de 3º harmônico defasado em 180°;
- 1% de 5º harmônico sem defasagem;
- 5% de 5º harmônico sem defasagem.

De acordo com a literatura [3], a maior influência causada pela terceira harmônica ocorre quando sua defasagem é de 180°, enquanto a maior influência causada pela quinta harmônica ocorre quando não há defasagem. Desta maneira foram utilizadas estas defasagens na adição de cada componente, visando a análise dos casos mais críticos.

O outro estudo apresenta a influência de harmônicas na tensão da rede sobre a corrente total, analisando o aumento de suas componentes harmônicas.

4.2.1. Influência da presença de 3º harmônico na tensão da rede sobre a corrente resistiva

A Figura 17 apresenta uma curva típica da corrente resistiva de fuga de um para-raios sem nenhuma influência de harmônicos na tensão da rede utilizando os parâmetros já citados, obtida através de simulação. Observa-se que o valor máximo da corrente resistiva é de $I_r=57,47\mu A$. Nota-se visualmente que a curva não é puramente senoidal, apresentando conteúdo harmônico, que não se deve às harmônicas tensão da rede, e sim devido à característica não-linear intrínseca típicas de blocos de ZnO.

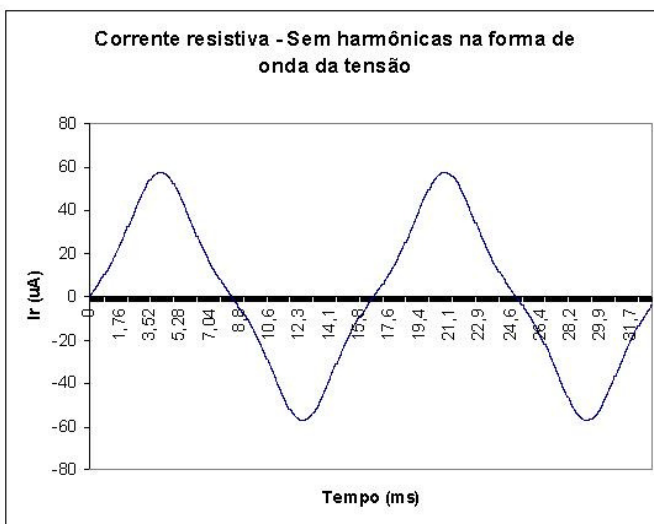


Figura 17 - I_r sem a presença de harmônicos na tensão

Ao se adicionar à tensão de entrada 1% de harmônicos de 3ª ordem, defasados de 180° da tensão fundamental, há uma leve diferença na corrente resistiva simulada, conforme mostra a Figura 18. Embora não se possa notar diferença significativa com relação à curva anterior, a corrente resistiva teve um acréscimo em sua amplitude, passando para $I_r=59,107\mu A$, o que implica em um aumento de 3% na corrente obtida.

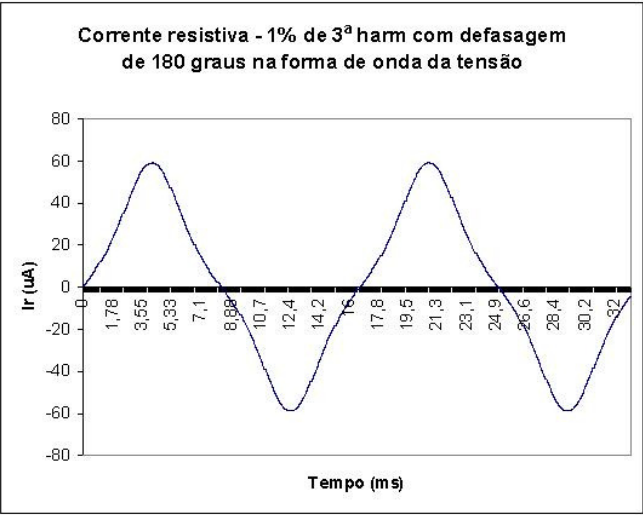


Figura 18 - I_r com 1% de harmônicos na tensão defasado de 180°

A Figura 19 apresenta a forma de onda da corrente resistiva simulada ao se adicionar 5% de 3º harmônica defasada de 180° . Ao se comparar a forma de onda com as outras curvas simuladas e apresentadas anteriormente, nota-se visualmente que ocorre uma modificação no formato de onda, além de, novamente, um aumento no valor de pico. A corrente resistiva máxima é de $I_r=66,69\mu A$, representando um aumento de 16,2% com relação à corrente sem a presença de harmônicos na tensão do sistema.

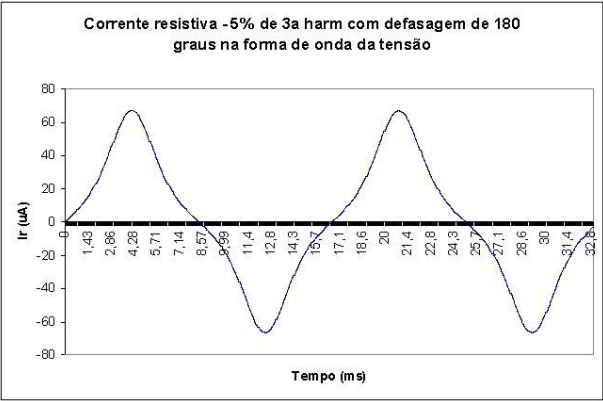


Figura 19 - I_r com 5% de harmônico na tensão defasado de 180°

Através deste estudo teórico, observa-se que é necessário um conteúdo harmônico significativo na tensão para que ocorra uma influência também significativa sobre a parcela resistiva da corrente de fuga. A Figura 20 apresenta uma comparação entre os três casos simulados, onde as curvas de corrente possuem apenas diferenças sutis.

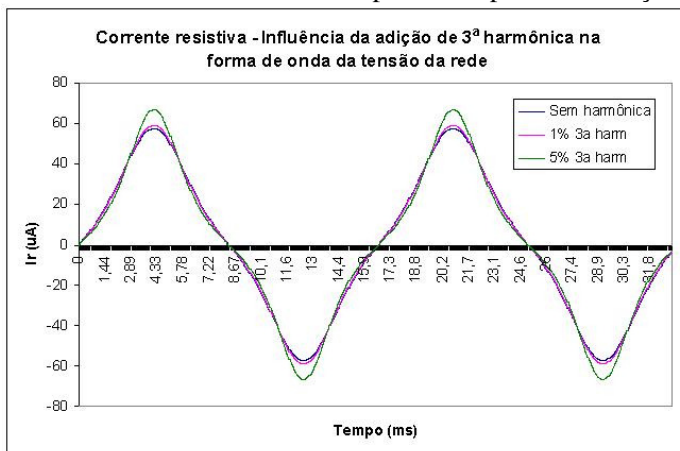


Figura 20 - Comparação entre correntes resistivas com e sem a presença de 3º harmônico na tensão

4.2.2. Influência da presença de 5º harmônico na tensão da rede sobre a corrente resistiva

O estudo realizado com acréscimo do 5º harmônico na forma de onda da tensão, foi feito de maneira semelhante ao para a adição de 3º harmônico. Os resultados para este caso de estudo também serão comparados com a mesma corrente resistiva sem nenhuma influência de harmônicos, a qual teve uma amplitude de $I_r = 57,47 \mu A$ cuja forma de onda foi apresentada na Figura 17.

A Figura 21 apresenta a forma de onda da corrente encontrada com a adição de 1% de componente harmônica de 5ª ordem sem defasagem na tensão. Ao se comparar com a corrente sem a presença de harmônicos, observa-se um pequeno aumento no pico da corrente resistiva que, neste caso, foi de $I_r = 59,107 \mu A$. Este é o mesmo valor encontrado para o caso com acréscimo de 1% de 3ª harmônica na tensão.

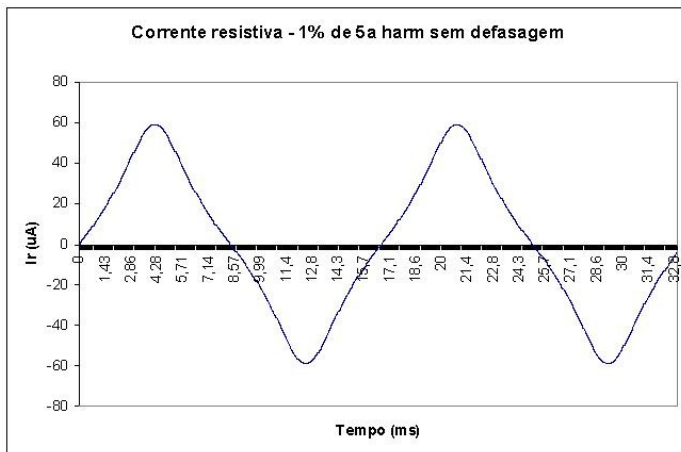


Figura 21 - I_r com 1% de 5º harmônico na tensão sem defasagem

Na Figura 22 é apresentado o resultado da corrente resistiva encontrada com 5% de harmônicos de 5ª ordem sem defasagem na forma de onda da tensão. Conforme a forma de onda apresentada nesta figura nota-se um aumento na corrente resistiva $I_r = 66,687 \mu A$, sendo um valor muito próximo do calculado no mesmo caso para a 3ª harmônica.

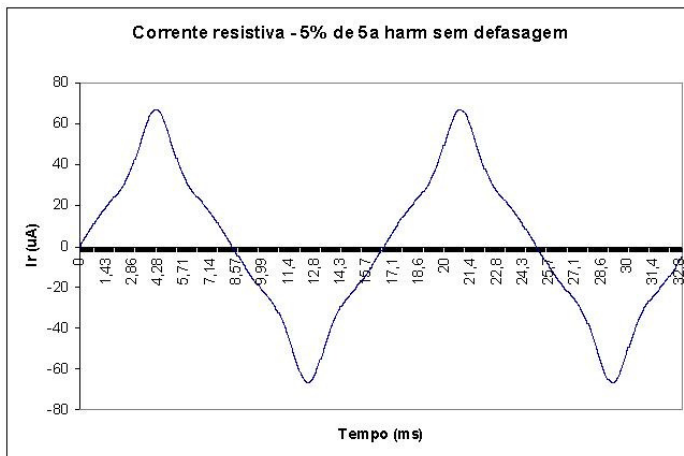


Figura 22 - I_r com 5% de 5º harmônico na tensão sem defasagem

A Figura 23 apresenta a comparação entre os resultados da corrente resistiva com 5ª harmônica. Para a ocorrência de conteúdo

harmônico de 5ª ordem, o mesmo comportamento que para os casos contendo o 3º harmônico é observado. Há um aumento na corrente resistiva com o aumento da distorção aplicada, além de uma pequena mudança na forma de onda da corrente com aumento de amplitude da 5ª harmônica.

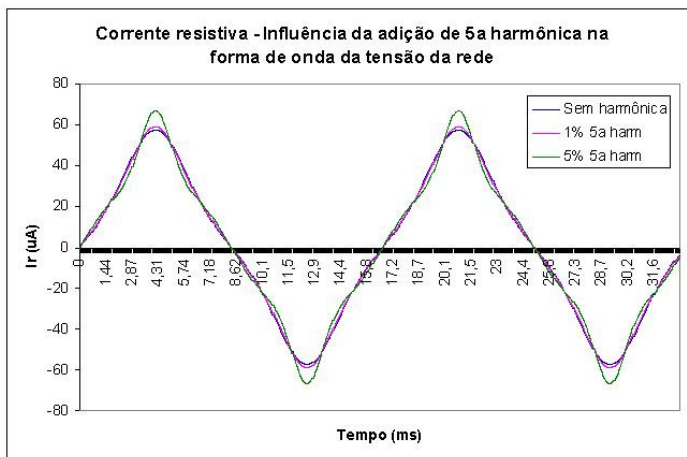


Figura 23 - Comparação entre correntes resistivas com e sem a presença de 5º harmônico na tensão

4.2.3. Influência da presença de harmônicos na tensão da rede sobre a corrente total

Uma das técnicas utilizadas para a avaliação do para-raios pela sua corrente de fuga é a análise da terceira harmônica da corrente total. Caso não existam harmônicos na tensão, toda a distorção harmônica da corrente total é gerada devido à componente resistiva, de modo que o estado da degradação do para-raios possa ser verificado a partir da análise harmônica da corrente de fuga total.

Com a existência de harmônicos na tensão e a consequente distorção da corrente capacitiva, a terceira harmônica da corrente total será a soma das parcelas resistiva e da capacitiva. Desta maneira, 1% de harmônicos de terceira ordem na rede pode causar um aumento significativo na componente de terceira harmônica da corrente total, podendo induzir a erro na avaliação do para-raios. Utilizando o mesmo programa numérico para o estudo do conteúdo harmônico de tensão acima mostrado, foi montada a Tabela 4.1 apresentando os valores de

terceira harmônica da corrente resistiva e da corrente total nos casos sem harmônicos de tensão, com acréscimo de 1% de terceiro harmônico sem defasagem e com acréscimo de 1% de terceiro harmônico com defasagem de 180°. A Tabela 4.1 apresenta também o aumento da 3ª harmônica da corrente de fuga total em relação ao aumento desta componente na corrente resistiva, calculado através de (4.4).

$$Aumento(\%) = I_r / I_r \times 100 \quad (4.4)$$

Tabela 4.1 – Valores de 3ª harmônica obtidos

	3o harm Ir (uA)	3o harm It (uA)	Diferença (%)
Sem harm. na rede	7,599	7,599	0
1% de 3o harm sem def	6,654	33,234	499,45
1% de 3o harm com def	8,552	33,571	392,55

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.1, comprova-se que, caso não haja distorção na forma de onda da rede, a componente de 3º harmônico da corrente total é igual à da corrente resistiva, podendo ser utilizado o método do monitoramento do conteúdo de terceiro harmônico da corrente de fuga total na avaliação da degradação do para-raios. Entretanto, com a presença de harmônicos na forma de onda da tensão, há distorção na forma de onda capacitiva, somando também uma componente harmônica da corrente capacitiva na forma de onda de corrente de fuga total, diminuindo a precisão da medida e da avaliação do estado do varistor. Deste modo, caso seja utilizada a técnica através da medição pelo 3º harmônico da corrente total, os harmônicos presentes na tensão da rede devem ser, teoricamente, compensados, a fim de evitar erros de medição.

4.3. Influência da variação da amplitude de tensão

Sabe-se que com o aumento da amplitude da tensão de alimentação aplicada aos varistores, tanto a corrente resistiva quanto suas componentes harmônicas sofrem alterações. Isso ocorre devido ao fato de, quanto maior a amplitude da tensão aplicada sobre o varistor, maior o grau de não-linearidade de seu ponto de operação. Assim, se a amplitude da tensão for elevada, a resposta da corrente apresenta componentes harmônicas com maior amplitude. A Figura 24 apresenta os valores das componentes harmônicas da corrente resistiva de um

para-raios simulado conforme a metodologia descrita acima para amplitudes de tensão iguais a 0,95pu, 1pu e 1,05pu.

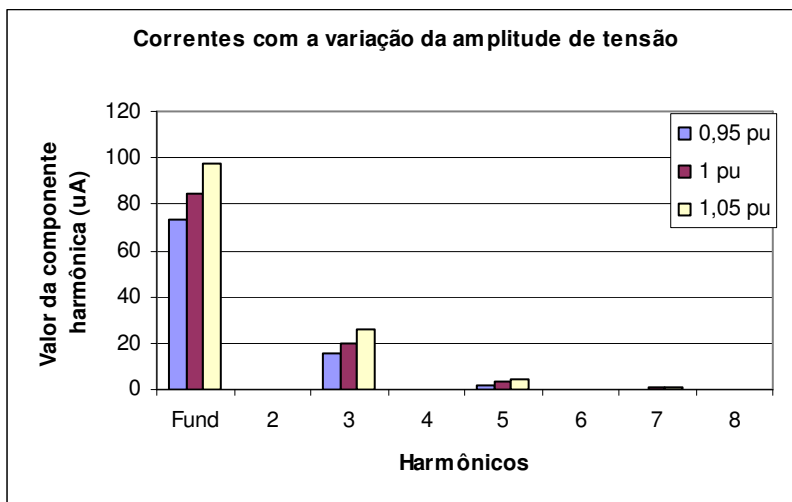


Figura 24 - Corrente resistiva com o aumento da amplitude da tensão

Observa-se que com o aumento da tensão há o aumento das componentes harmônicas presentes na corrente resistiva. A Tabela 4.2 apresenta os valores de simulação para a corrente resistiva e suas harmônicas. As amplitudes percentuais têm como base o valor da componente fundamental de corrente para cada amplitude de tensão, conforme a relação apresentada em (4.5).

$$Amp(\%) = \frac{I_r^n}{I_r^{fund}} \quad (4.5)$$

Tabela 4.2 – Influência da amplitude da tensão na corrente

	V=0,95		V=1,0		V=1,05	
	Ir (uA)	Amp%	Ir (uA)	Amp%	Ir (uA)	Amp%
Fundamental	73,225	100	84,377	100	97,873	100
3º harm	15,777	21,54	20,151	23,88	25,869	26,431
5º harm	2,067	2,822	3,048	3,612	4,512	4,610
7º harm	0,287	0,394	0,486	0,575	0,824	0,841

Observa-se que há um aumento da relação entre as componentes harmônicas e a fundamental de acordo com o aumento da amplitude de tensão, aumentando também a taxa de distorção harmônica.

Sabe-se que a tensão da rede elétrica não se mantém em um valor constante, podendo isto influenciar no valor medido de corrente resistiva de fuga. Desta maneira, para se obter uma normalização dos valores, viabilizando a comparação entre medições de um mesmo para-raios realizadas em tempos distintos, é necessário o conhecimento do valor da tensão, podendo realizar desta forma a correção da corrente resistiva de fuga.

4.4. Análise da influência da temperatura

Utilizando o mesmo instrumento virtual das outras análises, foi verificada a influência da temperatura sobre os valores de corrente medidos. Desta vez, foram utilizadas outras três combinações dos parâmetros (a , Um e β), encontrados para a curva característica de um varistor sob diferentes temperaturas (20°C, 60°C e 100°C). Os valores foram novamente retirados da tese de James Silveira [3], que por sua vez, foram obtidos a partir de estudos experimentais realizados por Jorge Luiz de Franco [25]. Para as simulações, foi utilizado o mesmo sinal de tensão, cujo valor de pico é de 230kV, sem conteúdo harmônico. A Tabela 4.3 apresenta os valores dos parâmetros utilizados para cada temperatura.

Tabela 4.3 – Parâmetros utilizados para diferentes temperaturas

Temp	Parâmetros		
	Um	a	$Beta$
20°C	1,2395	34,9154	48,3793
60°C	1,23	53,1545	46,7123
100°C	1,2216	85,4672	0,3291

As simulações foram realizadas em quatro valores de tensão diferentes (0,5pu, 0,8pu, 1,0pu e 1,10pu), verificando a influência da temperatura em diferentes pontos de operação do varistor. Em cada um desses pontos, foram verificadas as variações nos valores de corrente resistiva de pico, da componente fundamental da corrente resistiva e da componente de 3ª harmônica da corrente total. A Tabela 4.4 apresenta os valores obtidos através das simulações:

Tabela 4.4 – Influência da temperatura do varistor na corrente

Tensão (pu)	Temp	Correntes (uA)			Diferenças (%)		
		Ir pico	Ir fund	3a harm rms	Ir pico	Ir fund	3a harm rms
0,5	20°C	22,95	21,621	0,899	0	0	0
	60°C	49,1	47,021	1,41	113,94	117,48	56,84
	100°C	117,35	113,917	3,27	411,33	426,88	263,74
0,8	20°C	57,57	48,336	5,64	0	0	0
	60°C	111,52	96,895	8,9	93,71	100,46	57,80
	100°C	242,58	218,201	14,78	321,36	351,42	162,05
1,0	20°C	132,28	93,639	19,96	0	0	0
	60°C	237,52	174,677	32,14	79,55	86,54	61,02
	100°C	470,81	363,84	54,39	255,92	288,55	172,49
1,1	20°C	257,24	153,181	45,46	0	0	0
	60°C	451,98	276,195	75,24	75,70	80,3	65,50
	100°C	859,13	547,548	130,78	233,98	257,45	187,68

As Figuras 25, 26, 27 e 28 apresentam os gráficos com os valores de corrente resistiva e de 3ª harmônica obtidos nas simulações para as três temperaturas e as diferenças em relação ao valor medido na temperatura de 20°C para cada tensão.

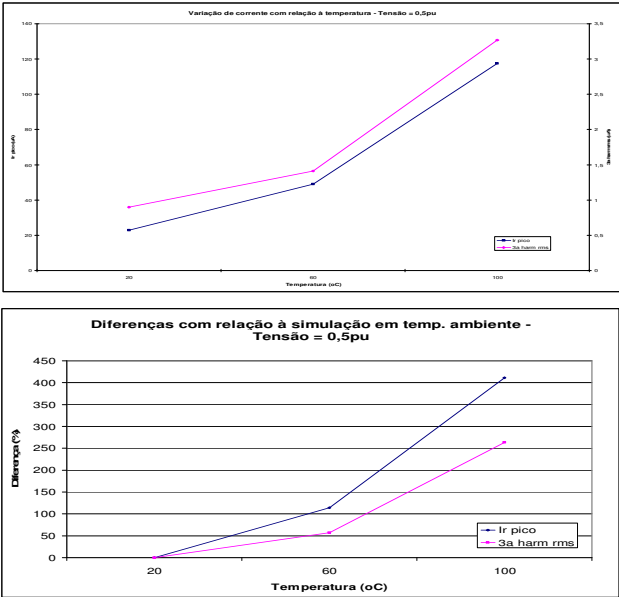


Figura 25 - Correntes obtidas com o aumento da temperatura – 0,5pu

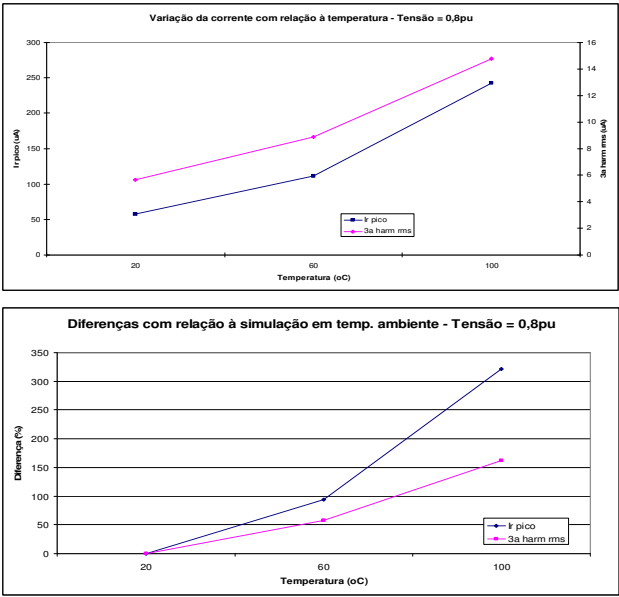


Figura 26 - Correntes obtidas com o aumento da temperatura – 0,8pu

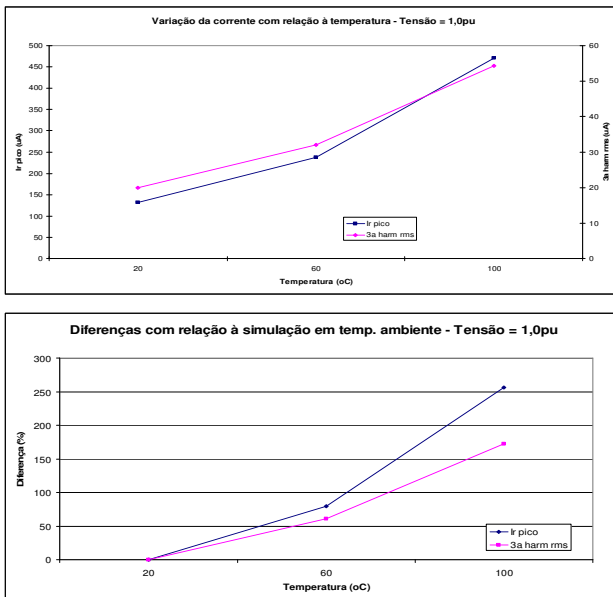


Figura 27 - Correntes obtidas com o aumento da temperatura – 1,0pu

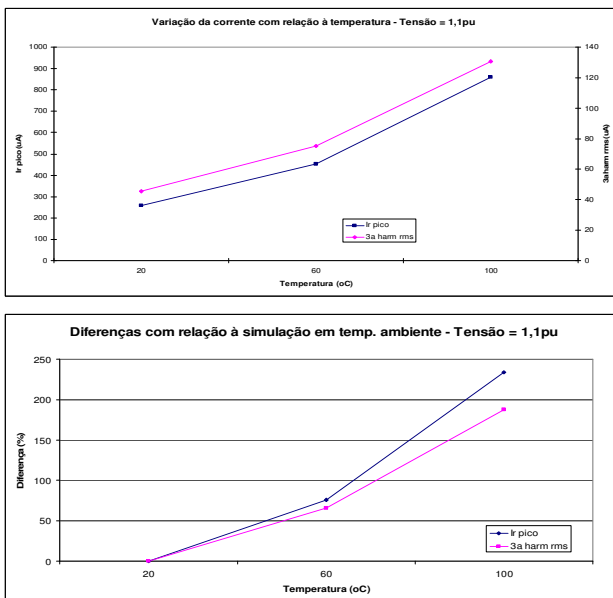


Figura 28 - Correntes obtidas com o aumento da temperatura – 1,1pu

Com o aumento da temperatura, nota-se um aumento no valor da corrente resistiva e da componente de terceira harmônica, conforme esperado. A diferença nos valores de correntes obtidos em 60°C e 100°C com relação ao valor encontrado para a temperatura ambiente é maior para a corrente resistiva total do que para a componente de terceira harmônica de corrente. Com o aumento da tensão, a diferença do valor obtido nas temperaturas maiores em relação à ambiente aumenta para a componente de 3ª harmônica e diminui para a corrente resistiva de pico, o que pode ser observado pela aproximação das retas com as diferenças com relação à referência.

Analisando os valores absolutos obtidos, percebe-se que a corrente resistiva aumentou significativamente com o aumento da temperatura, podendo indicar erroneamente a degradação de um para-raios. Já a componente de terceira harmônica, apesar da grande diferença percentual com o aumento da temperatura, apresenta valores absolutos na mesma ordem de grandeza, não indicando uma degradação do para-raios. Como a variação de temperatura para os para-raios numa subestação não chega a 60°C, pode-se dizer que a variação na componente de 3ª harmônica de corrente não é significativa na prática.

Na Tabela 4.4, observa-se que há grande variação da componente fundamental da corrente resistiva de fuga, sendo essa a principal responsável pela sua variação com relação à temperatura. Há o aumento na componente fundamental acima de 86%, representando um aumento em seu valor absoluto de aproximadamente 90μA. Desta forma, pelo fato de a variação das componentes harmônicas ser pouco significativa, pode-se dizer que o aumento na componente resistiva de fuga se deve, principalmente, à sua componente fundamental, que apresenta variação significativa com o aumento da temperatura, principalmente em baixas tensões. Na literatura [3], onde é apresentado um estudo da variação da taxa de distorção harmônica com a mudança da temperatura sobre o varistor, o aumento na componente fundamental pode ser verificado também, apresentando variações mais significativas que as componentes de 3ª e 5ª harmônica.

4.5. Análise da degradação dos para-raios

Para a análise da degradação dos para-raios, foi analisada através de simulação a variação dos valores da corrente resistiva de pico e da componente da terceira harmônica da corrente total eficaz, verificando o aumento das correntes de fuga do para-raios comparando dois varistores, sendo um para-raios em estado normal e outro degradado. Para isto,

foram utilizadas outras duas combinações dos parâmetros de entrada para o VI já utilizado nas simulações anteriores, uma para cada caso. A tensão utilizada para a simulação foi de 230kV, sem a adição de conteúdo harmônico. Ambas as combinações foram retiradas da referência [3]. Os parâmetros utilizados, assim como os valores de corrente obtidos, estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Influência da degradação do para-raios na corrente

Estado	Parâmetros			Correntes (uA)			Aumento (%)		
	U_m	a	β	I_r pico	I_t eficaz	$3a$ harm rms	I_r pico	I_t eficaz	$3a$ harm rms
Normal	1,4903	74,7083	115,637	56,69	611,09	5,49	0	0	0
Degradado	1,5953	251,553	464,515	82,29	611,86	20,08	45,15	0,1	265,75

Ao comparar os valores de corrente obtidos para o para-raios degradado com relação ao para-raios em estado normal, observa-se uma variação de 45% no valor medido da corrente resistiva de pico. Para os valores da componente de terceira harmônica obtidos, há a variação de 265% em seu valor.

Analizando os valores de corrente total obtidos na simulação, observa-se que o aumento é muito pequeno (0,1%), não indicando a degradação do para-raios. Desta forma, o método da medição da corrente de fuga total se mostra inviável, pois não apresenta resultado confiável.

Ao comparar a corrente resistiva e sua componente de 3ª harmônica, observa-se que, no para-raios em bom estado, a componente de terceira harmônica corresponde a menos de 10% da corrente resistiva, aumentando para 25% no caso do para-raios degradado.

Deve-se lembrar que os valores absolutos apresentados variam de acordo com o para-raios em medição. É comum que, nas medições de para-raios em estado normal de operação, os valores absolutos obtidos de correntes de fuga sejam maiores que os aqui apresentados, sendo este estudo apenas um comparativo entre o aumento percentual das correntes.

4.6. Considerações gerais

Através de estudos teóricos realizados por meio de simulações de varistores de ZnO, foram verificadas as influências causadas pela existência de conteúdo harmônico na tensão da rede, da amplitude da

tensão e da temperatura ambiente sobre a variação da corrente de fuga resistiva e sua componente de terceira harmônica.

A existência de harmônicos na forma de onda da tensão da rede causa um aumento relativamente pequeno na corrente resistiva medida, sendo necessária uma alta taxa de distorção harmônica para a variação significativa de seu valor. Por outro lado, há um aumento significativo na componente de terceira harmônica da corrente de fuga total, podendo teoricamente inviabilizar o método de avaliação através da medição desta componente caso não seja realizada a compensação dos harmônicos da rede.

Com o aumento da amplitude da tensão de operação, o varistor opera em uma região de maior não-linearidade. Desta maneira, há o aumento das componentes harmônicas da corrente resistiva de fuga e da taxa de distorção harmônica. Pelo fato de a tensão da rede elétrica não se manter constante, é necessária a compensação da corrente resistiva de fuga com relação à tensão, possibilitando a comparação entre as medições realizadas em diferentes períodos de tempo e, possivelmente, diferentes tensões de operação.

Com o aumento da temperatura a que o para-raios está submetido, há um aumento significativo na corrente resistiva de fuga, devido à variação do valor de sua componente fundamental. A componente de terceira harmônica, por outro lado, apresenta menor sensibilidade, de modo que haja menor variação em seus valores frente ao mesmo aumento na temperatura.

Através de simulação, também se observou que a componente de terceira harmônica da corrente de fuga é mais sensível que as outras medições em relação à degradação do para-raios. Percentualmente, se observa um aumento significativamente maior que o verificado na corrente resistiva e na corrente de fuga total, sendo que esta última não apresentou variação em seu valor.

O capítulo seguinte apresenta um estudo dos campos elétricos e magnéticos externos, originados pelos condutores de energia, na altura da base do para-raios, local onde são feitas as medições, analisando sua possível influência sobre instrumentos e métodos de medição da corrente de fuga.

5. Análise da distribuição dos campos elétricos e magnéticos no ambiente de medição de corrente de fuga

5.1. Introdução

Para a realização de avaliações *on-line* do estado de operação de para-raios de ZnO através da corrente de fuga, a medição pode ser feita através de instrumentos de monitoramento que utilizam uma sonda de corrente conectada ao terminal de aterramento do para-raios. Esta sonda é excitada pelo campo magnético gerado pela corrente de fuga e fornece o valor de corrente relativo a este campo. Para a realização da compensação da corrente capacitiva, de forma a obter maior precisão nos resultados, pode ser utilizada também uma sonda de campo elétrico.

As subestações, locais onde são normalmente realizadas as medições da corrente de fuga, são ambientes poluídos eletromagneticamente. Pelo fato de cada módulo possuir três condutores, referentes às três fases do sistema trifásico, a tensão e a corrente que passam pelos condutores adjacentes ao do para-raios em questão gera campos elétricos e magnéticos que podem interferir nos instrumentos de medição.

Neste capítulo serão apresentadas simulações realizadas para a determinação dos campos elétricos e magnéticos na altura da base do para-raios, onde normalmente se realizam as medições. Serão apresentadas também algumas medições de campo realizadas em subestação da ELETROSUL com instrumentos comerciais, verificando a influência causada pelos campos externos sobre os valores medidos.

5.2. Influências de campos externos em medições

Para o estudo das influências dos campos magnéticos e elétricos externos, inicialmente foram realizadas algumas medições de corrente de fuga em subestações da ELETROSUL utilizando instrumentos comerciais, verificando uma possível influência sobre os valores de corrente de fuga medidos. Para o estudo experimental, foram utilizados dois instrumentos, denominados A e B, cada um com características próprias. As características e medidas obtidas por cada instrumento estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Instrumentos de medição

Instrumento	Medições
Instrumento A	Realiza a medição utilizando duas sondas, sendo uma de corrente e outra de campo elétrico. Fornece o valor de pico da corrente resistiva com correção de tensão e temperatura ambiente (I_r corr), corrente total de pico (I_t) e corrente resistiva de pico sem correção (I_r). Todas as medidas possuem compensação de harmônicas da tensão e as correções são feitas com base na norma IEC 60099-5.
Instrumento B	Realiza a medição da corrente de fuga total (em valores eficazes ou de pico) ou da componente de terceira harmônica da corrente de fuga total do para-raios (somente em valor eficaz).

Os instrumentos A e B utilizam sonda de corrente do tipo alicate. Embora as medições de corrente de fuga devam ser realizadas com a sonda de corrente conectada ao cabo de aterramento do para-raios, algumas medições foram realizadas com esta sonda desconectada do cabo de aterramento, de modo a se verificar a influência dos campos magnéticos do ambiente sobre a medição. Em ambos os instrumentos foram detectados pequenos valores de corrente. A Tabela 5.2 apresenta os valores destas medições realizadas em três subestações (denominadas subA, subB e subC), em locais próximos à instalação dos para-raios sob teste.

Tabela 5.2 – Medições com a sonda de corrente ao ar livre

Subestação	Inst. A (uA)			Inst. B (uA)	
	I_r corr	I_r	I_t	I_t	3ª harm
subA	7	7	63	-	-
subA	2	2	87	-	-
subA	3	2	90	-	-
subA	7	6	82	-	-
subB	6	7	93	100	90
subB	4	4	120	1	0
subB	8	10	59	-	-
subB	8	10	58	-	-
subC	3	3	105	64	2
subC	4	3	86	10	2

Nota-se que, em alguns dos testes realizados, a amplitude do valor de corrente é suficiente para alterar o resultado da medição de corrente de fuga, uma vez que esta apresenta valores relativamente baixos. A corrente resistiva do para-raios em geral é da ordem de poucas dezenas de microamperes. Desta maneira, observa-se que durante a realização de ensaios de corrente de fuga de para-raios, pode haver a influência do campo magnético do ambiente sobre as medições.

Outro estudo realizado foi o da influência causada pelo campo elétrico externo sobre os valores de corrente de fuga medidos em instrumentos que necessitam da sonda de campo para a realização da compensação das harmônicas da tensão na rede. Para isso, foram realizadas medições apenas com o instrumento A, único que possui sonda de campo elétrico, alterando propositalmente a posição desta sonda com relação à altura e à distância lateral da base do para-raios, mantendo a sonda de corrente em seu cabo de aterramento. Considerando a base do para-raios como referência, a sonda de campo elétrico foi movimentada paralelamente ao condutor de energia nas duas direções e também com relação à altura. Com a variação da posição da sonda de campo, observou-se que diferentes valores de corrente de fuga foram medidos. A Tabela 5.3 apresenta os valores medidos com o distanciamento da sonda de campo elétrico, para: a) paralelo à linha para o lado oposto ao de descida do cabo de aterramento (índice D), b) paralelo à linha para o lado da descida do cabo de aterramento (índice E), e c) paralelo à linha, variando simultaneamente a altura da sonda e a distância com relação à base (índice F).

Tabela 5.3 – Medições com variação na posição da sonda de tensão

Índice	Instrumento A (μA)					Variação (cm)	
	<i>Ir corr</i>	<i>Dif. % Ir corr</i>	<i>Ir</i>	<i>Dif % Ir</i>	<i>It</i>	<i>Dist.</i>	<i>Altura</i>
D (referência)	74	0	81	0	873	0	-
D	82	-10,81	90	-11,11	873	50	-
D	86	-16,22	94	-16,05	871	150	-
D	83	-12,17	92	-13,58	870	125	-
D	82	-10,81	91	-12,35	871	100	-
D	78	-5,40	85	-4,94	871	50	-
D	73	1,35	81	0	872	0	-
E	60	18,92	76	6,17	881	0	-
E	54	27,03	68	16,05	882	50	-
E	49	33,78	62	23,46	882	100	-
E	44	40,54	55	32,10	883	150	-
E	32	56,75	41	49,38	884	200	-
E	16	78,38	21	74,07	884	250	-
E	12	83,78	15	81,48	883	300	-
E	14	81,08	18	77,78	884	250	-
E	22	70,27	28	65,43	883	200	-
E	38	48,65	48	40,74	883	150	-
E	47	36,48	59	27,16	883	100	-
E	50	32,43	63	22,22	882	50	-
E	58	21,62	73	9,88	882	0	-
F	59	20,27	75	7,41	883	0	0
F	66	10,81	84	-3,70	882	0	-50
F	51	31,08	65	19,75	881	0	-100
F	27	63,51	35	56,79	880	100	-100
F	34	54,05	44	45,68	880	100	-70
F	43	41,89	55	32,10	880	100	0
F	67	9,46	85	-4,94	879	0	10
F	66	10,81	83	-2,47	878	100	10
F	67	9,46	85	-4,94	879	200	10

Na Tabela 5.3, a segunda e a quarta coluna apresentam as diferenças das correntes medidas com relação à referência (base do para-raios). A diferença percentual é calculada através da equação (5.1).

$$Dif \% = \frac{Valor\ de\ ref - Valor}{Valor\ de\ ref} 100 \quad (5.1)$$

As Figuras 29 e 30 ilustram os valores da corrente corrigida (*Ir corr*) obtidos com a variação arbitrária de posicionamento da sonda de tensão do instrumento A em relação à base do para-raios, conforme a Tabela 5.3. A Figura 29 corresponde às medições relativas ao índice D da tabela, enquanto a Figura 30 corresponde ao índice E.

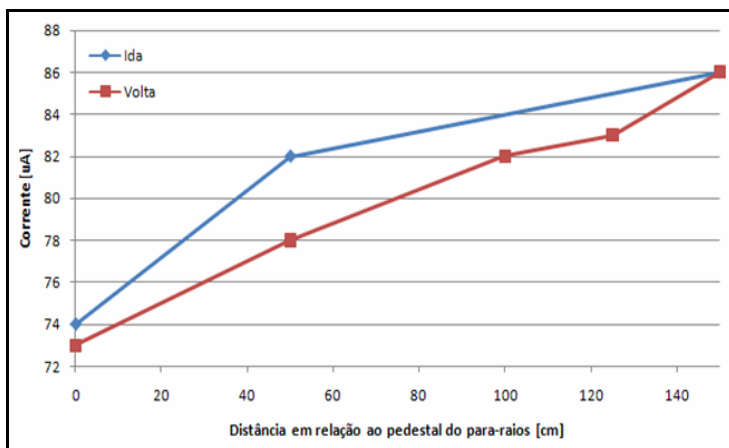


Figura 29 - Medições com a sonda de campo elétrico variando para o lado oposto do cabo de aterramento

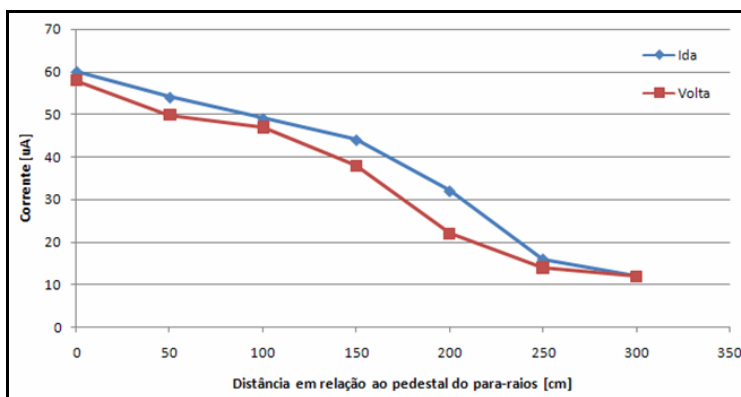


Figura 30 - Medições com a sonda de campo elétrico variando para o lado do cabo de aterramento

Nota-se que o comportamento difere em cada situação. Para os resultados apresentados na Figura 29, a tendência é de que os valores aumentem com o aumento da distância em relação à base do para-raios, enquanto para a Figura 30, a tendência é de diminuir. Esta diferença pode ocorrer devido às distribuições dos campos elétricos e magnéticos no ambiente, tanto em amplitude quanto em fase.

A Figura 31 ilustra o comportamento dos valores medidos da corrente resistiva corrigida quando a sonda de tensão varia simultaneamente em relação à altura e à distância da base do para-raios (índice F), apresentando também a diferença percentual entre o valor de referência e o ponto em questão. É observado que a variação do valor da corrente é mais significativa com a mudança da altura (onde há maior concentração de campo) do que apenas com a distância. Além disso, variando ambos simultaneamente, a mudança no valor de corrente de fuga medido é ainda maior.

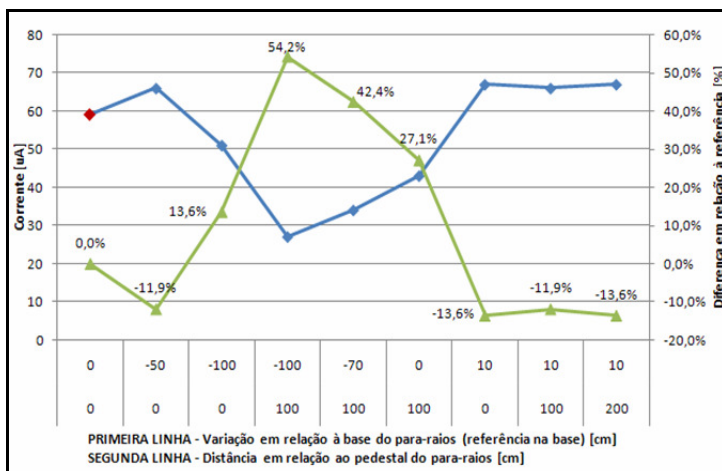


Figura 31 - Medições com a sonda de campo elétrico variando a distância e a altura em relação ao pedestal

Através do estudo da variação da posição da sonda de campo, pode-se observar que há uma sensibilidade desta com relação aos campos elétricos externos, podendo estes influenciar no resultado da medição. Para a realização da avaliação do estado de degradação do para-raios através da corrente de fuga, o fabricante do instrumento A recomenda que se mantenha a sonda de campo elétrico paralelamente aos condutores de energia e na altura da base do para-raios.

5.3. Estudo numérico da influência dos campos

Para avaliar as influências causadas pelos campos magnético e elétrico externos sobre as medições, foi feita uma análise da distribuição

e comportamento desses campos próximos à base do para-raios, local onde são instaladas as sondas de corrente e tensão, utilizando o método de elementos finitos. As simulações foram feitas utilizando alguns dados próximos da realidade de instalações da ELETROSUL.

No estudo apresentado é considerado também o efeito das ferragens e do aterramento do pedestal de sustentação do para-raios. Para as simulações, foi considerado um sistema trifásico balanceado, com distância de 4m entre os condutores e 5,5m de altura em relação ao solo. O pedestal do para-raios, utilizada como referência para o posicionamento das sondas, foi considerada de 1,5m de altura e 1,0m de largura. O raio de cada condutor do sistema foi suposto 50mm, devido à limitação do programa computacional utilizado.

As simulações foram realizadas através do software EFCAD [26]. Os desenhos dos domínios de cálculo foram feitos no módulo EFD e, para as simulações, foi utilizado o módulo EFCS, que realiza o cálculo estático do campo magnético ou elétrico. Desta maneira, foram realizados diversos cálculos estáticos, em diferentes instantes de tempo, de modo que fosse simulada uma forma de onda completa, totalizando 37 simulações para cada estudo correspondendo a um passo de tempo de 0,465ms.

5.3.1. Estudo do campo magnético

Para o estudo da distribuição do campo magnético, o espaço considerado para o domínio de cálculo foi de 18 metros de largura por 15 metros de altura. A corrente de linha fluindo pelos condutores do sistema nas três fases foi considerada 170A de pico, em 60Hz. Para a entrada do software, foi calculada a densidade de corrente, conforme indicado pelas equações (5.2), (5.3) e (5.4).

$$\text{Área do condutor: } A = 50^2 \pi = 7853,98 \text{mm}^2$$

$$\text{Fase A: } J_A = \frac{170}{A} \text{sen}(120\pi t) \quad (5.2)$$

$$\text{Fase B: } J_B = \frac{170}{A} \text{sen}(120\pi t - 120^\circ) \quad (5.3)$$

$$\text{Fase C: } J_C = \frac{170}{A} \text{sen}(120\pi t + 120^\circ) \quad (5.4)$$

Para a realização das 37 simulações, correspondendo a um período completo, foram obtidos os valores da densidade de corrente em cada instante de tempo. A partir do resultado de cada simulação, foram obtidas as duas componentes de campo magnético, horizontal (H_x) e vertical (H_y), próximas à base do para-raios. Para o efeito das ferragens do pedestal, essa base foi introduzida no software como sendo de ferro.

Os resultados dos cálculos foram obtidos a 1,6m de altura (0,1m acima do topo pedestal), próximo ao local onde é colocada a sonda de corrente. As Figuras 32 e 33 apresentam o comportamento dos campos obtidos em dois instantes de tempo diferentes ($\theta_a = 0^\circ$ e $\theta_a = 90^\circ$). Os condutores correspondem, da esquerda para a direita, às fases A, B e C

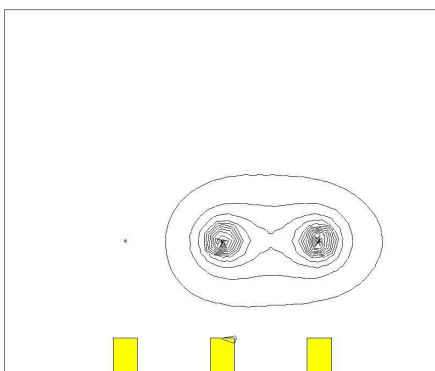


Figura 32 - Distribuição do campo magnético para corrente nula na fase A

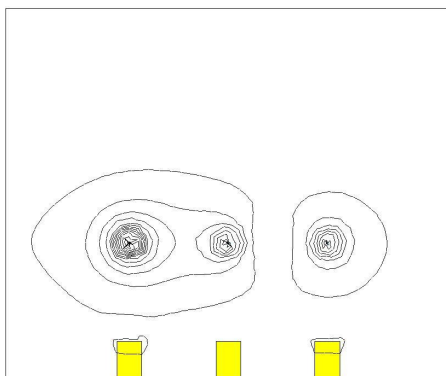


Figura 33 - Distribuição do campo magnético para corrente máxima na fase A

a) Campo magnético na fase A

A partir dos valores de campo magnético encontrados na fase A, foram criados dois gráficos, correspondendo às formas de onda de cada componente de campo H_x e H_y , comparando-as com a forma de onda da corrente no sistema. A Figura 34 apresenta as formas de onda dos campos horizontal e vertical encontrados sob a fase A.

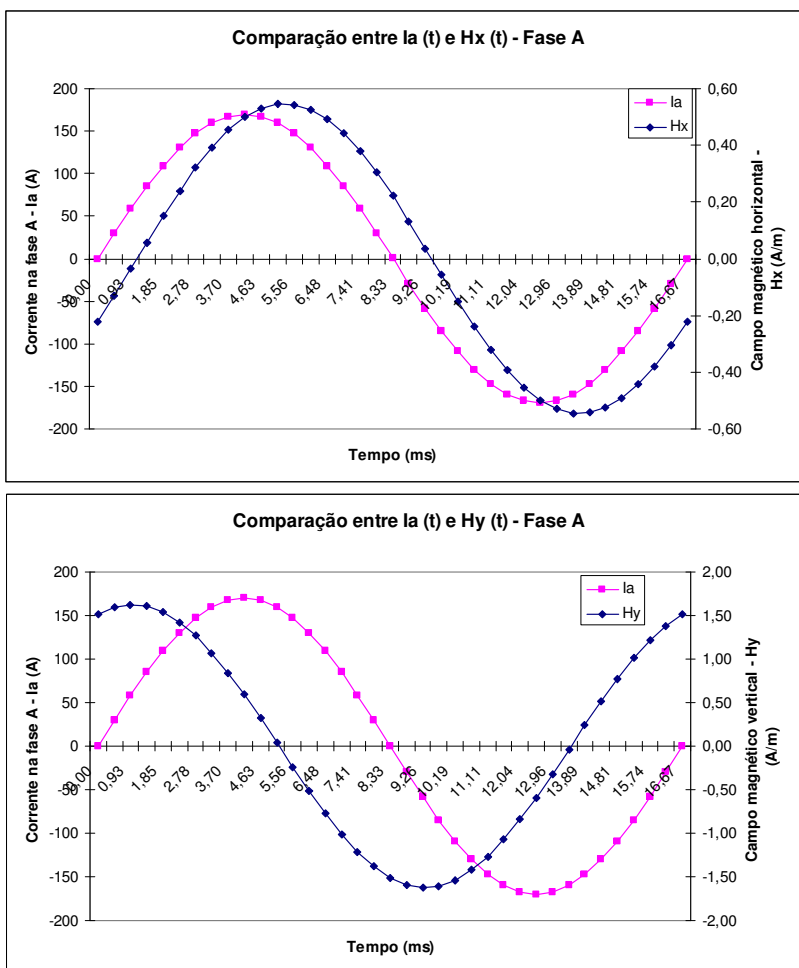


Figura 34 - Defasagem entre correntes e componentes de campo magnético externo – Fase A

Analisando os gráficos, nota-se que há um campo magnético externo à sonda defasado com relação à corrente que passa sobre o para-raios em questão. As componentes de campo magnético no local da medição não se encontram em fase com as da corrente da fase A. Ao ser captado pela sonda do instrumento de medição, esse campo pode ser somado ao produzido pela corrente de fuga do para-raios, criando um acoplamento magnético e modificando o valor medido.

A Figura 35 apresenta uma comparação entre as duas componentes de campo encontradas no local analisado. Nota-se que as amplitudes das são diferentes, sendo que a componente H_y possui amplitude maior que a H_x .

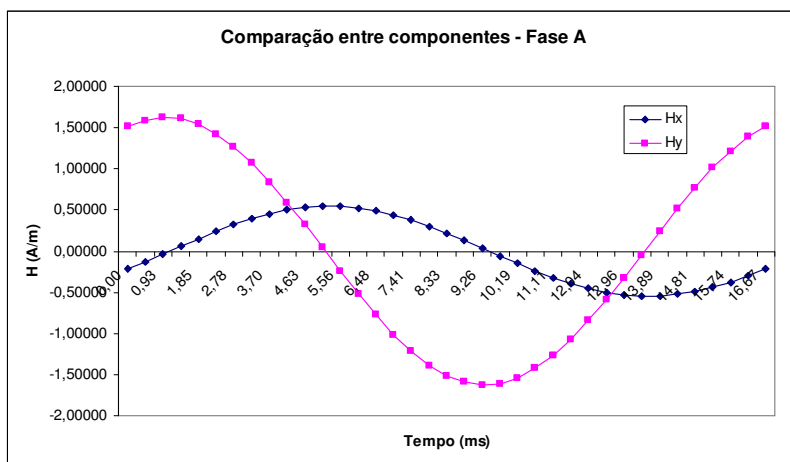


Figura 35 - Comparação entre componentes de campo magnético – Fase A

b) Campo magnético na fase B

Foram calculados da mesma maneira os campos encontrados sob a fase B. A Figura 36 apresenta os valores encontrados para H_x e H_y , e a Figura 37, a comparação entre as duas componentes.

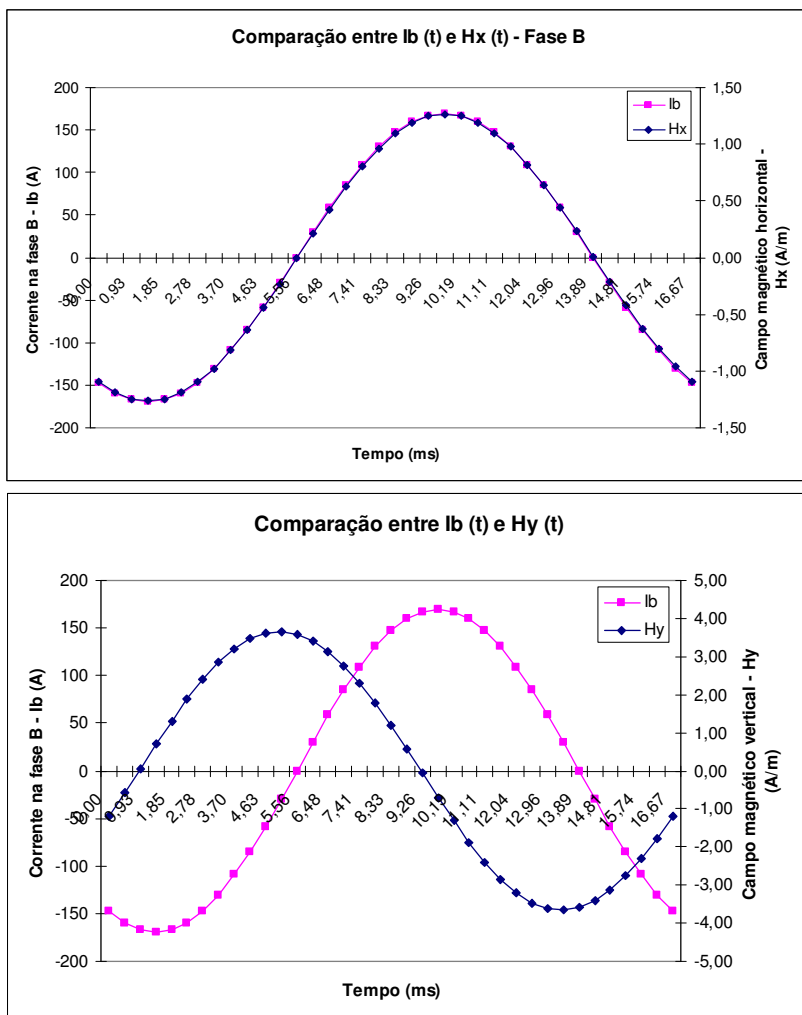


Figura 36 - Defasagem entre a corrente e componentes de campo magnético externo – Fase B

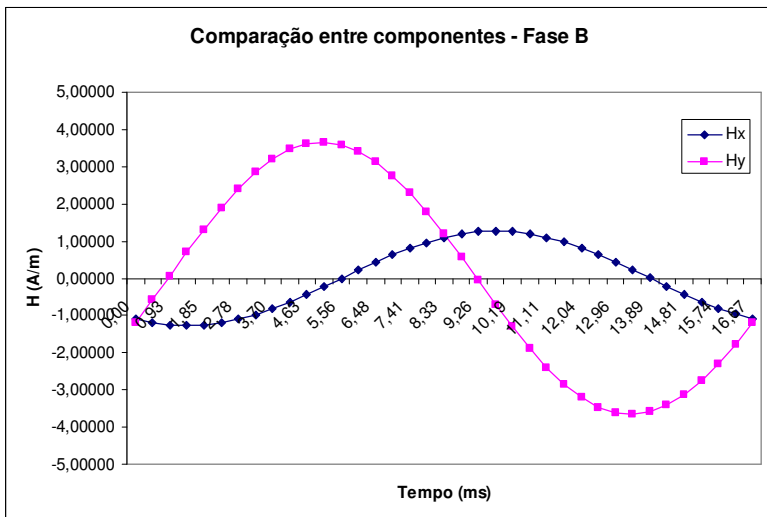


Figura 37 - Comparação entre componentes de campo magnético – Fase B

Novamente, nota-se a existência das duas componentes, sendo a componente vertical H_y de menor amplitude que a componente horizontal H_x . Nota-se que H_x não possui defasagem com relação à corrente na linha. Há também um aumento na amplitude das duas componentes do campo com relação à fase A.

c) Campo magnético na fase C

Os resultados encontrados para cada componente, H_x e H_y , sob a fase C, assim como a comparação entre as duas, são apresentados, respectivamente, nas Figuras 38 e 39.

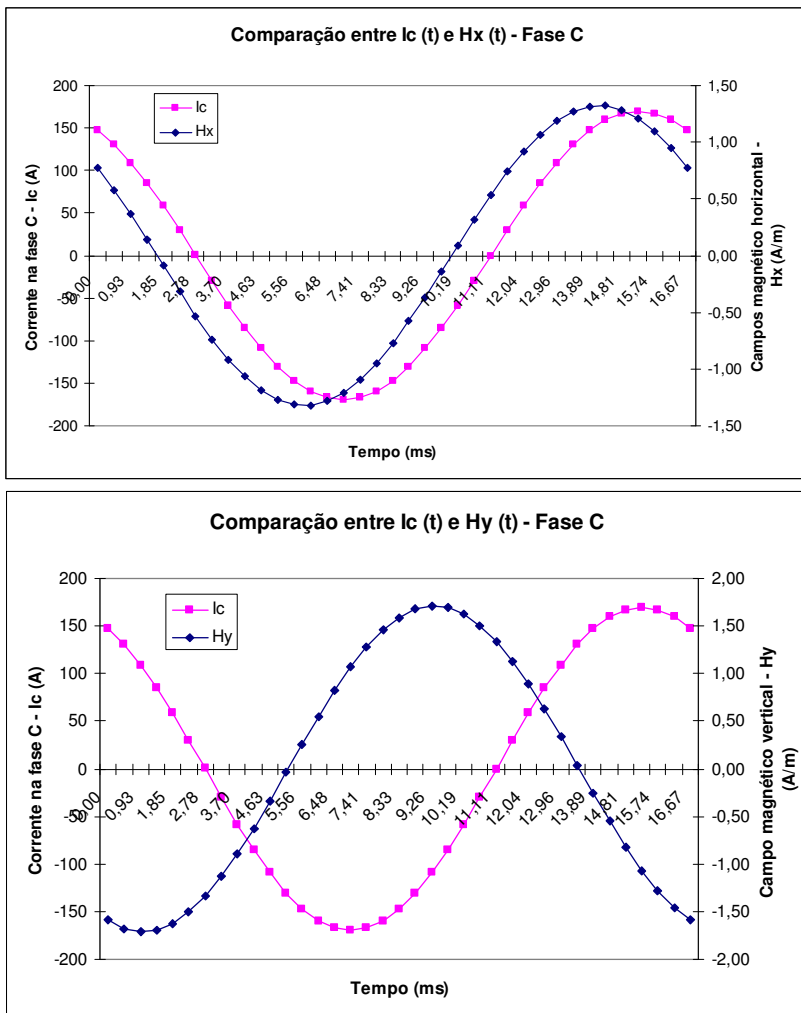


Figura 38 - Defasagem entre corrente e componentes do campo magnético externo – Fase C

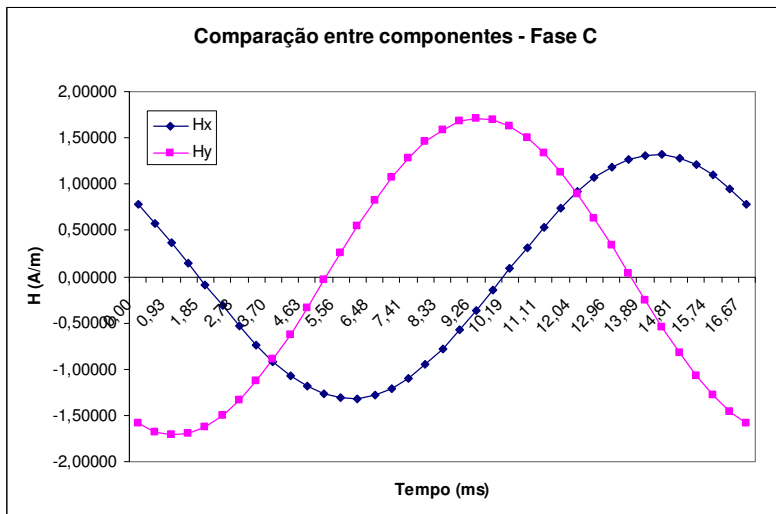


Figura 39 - Comparação entre componentes de campo magnético – Fase C

Ao se comparar as duas componentes, percebe-se que Hx possui amplitude menor que Hy. Também se observa que a componente horizontal possui amplitude maior que nas fases A e B. Já a componente vertical possui amplitude de valor próximo ao da fase A e menor que a verificada na fase B.

d) Módulos dos campos magnéticos

A partir dos valores encontrados, foi calculado o módulo do campo magnético sob cada fase. Com isso, foram obtidos três gráficos, e são apresentados na Figura 40.

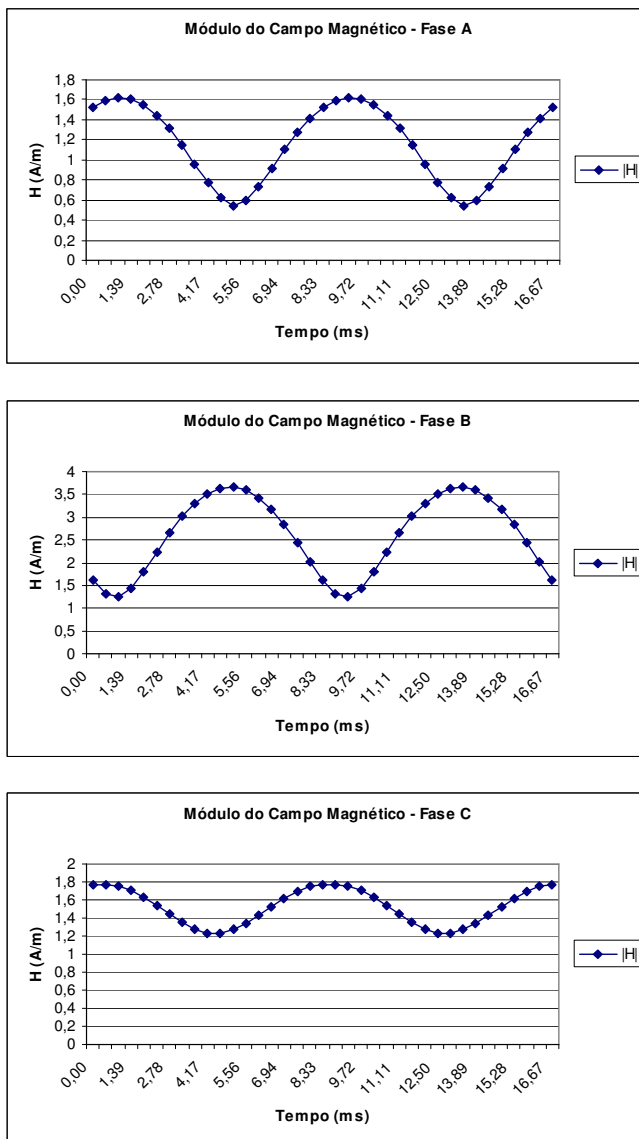


Figura 40 - Módulos dos campos magnéticos sob as fases A, B e C

Através da análise das formas de onda dos módulos dos campos magnéticos, é possível notar que eles não são nulos em nenhum instante. Desta forma, sempre haverá campo magnético externo e uma possível influência sobre a sonda de medição.

e) Possível acoplamento de campos externos com a sonda

Através do software EFCAD, foi realizada uma análise do acoplamento do campo magnético externo sobre a sonda de corrente do instrumento de medição. Para este estudo, além dos dados das simulações anteriores, foi inserida a representação de sonda de corrente com núcleo de ferrite (permeabilidade magnética $\mu=5305\mu_0$ e condutividade nula), com diâmetro externo de 7,5cm, diâmetro interno de 5cm, colocada próxima à base do para-raios. As Figuras 41 e 42 apresentam, respectivamente, a distribuição do campo no topo do pedestal do para-raios sem e com a presença da sonda, apenas para o caso onde a corrente na fase A é máxima ($\theta_a = 0^\circ$).

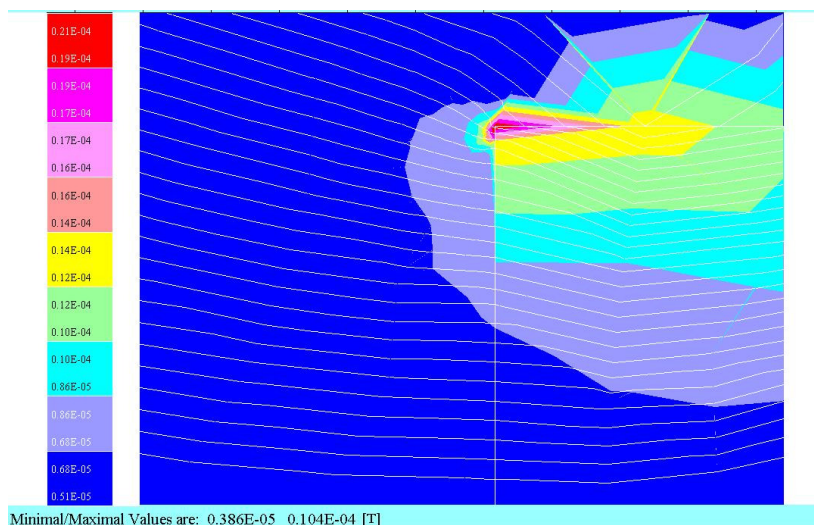


Figura 41 - Distribuição do campo na base do para-raios sem presença de sonda de corrente

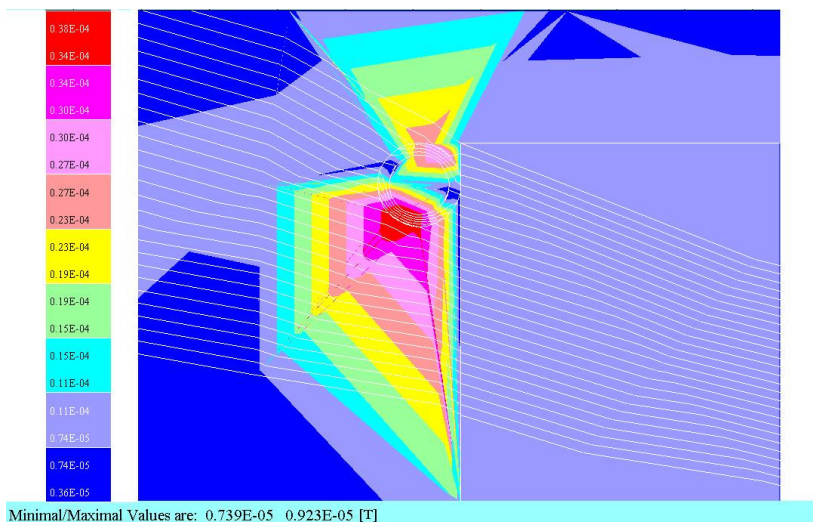


Figura 42 - Distribuição do campo na base do para-raios com a presença de sonda de corrente

Observa-se que, quando na presença de sonda de corrente, há o aumento da concentração de campo em torno do para-raios, quase dobrando seu valor. Além disso, a distribuição das linhas de campo é modificada, se concentrando na ferrite da sonda.

O acoplamento do campo magnético externo na sonda de corrente do instrumento pode influenciar significativamente na medição. Ao supor um raio de 6,25cm em volta do condutor de aterramento (valor aproximado para se calcular o caminho magnético da sonda de corrente), e que a corrente de fuga do para-raios tenha uma amplitude de 1mA, o campo magnético produzido é da ordem de aproximadamente 0,002A/m. Ao analisar os campos magnéticos calculados, pode-se ver que esses campos chegam a quase 4A/m, aproximadamente 2000 vezes superior que o gerado pela corrente de fuga. Assim, estes campos não podem ser desconsiderados.

Neste trabalho, a altura do pedestal onde se posiciona o para-raios foi considerada com 1,5m de altura. Em diversos casos, a altura onde se posiciona a sonda pode ser superior a este valor, de modo que o campo magnético externo pode ser de maior amplitude, tendo efeitos mais críticos sobre as medições.

5.3.2. Estudo do campo elétrico

Para a análise do comportamento do campo elétrico, o espaço considerado para o domínio de cálculo foi de 18 metros de largura por 5,5 metros de altura (altura da linha). A tensão considerada foi de 230kV de linha (132,8kV de fase), em 60Hz e sequência direta. Para esta simulação, as linhas foram representadas por pequenas retas de 100mm de comprimento (equivalente a condutores deste comprimento com raio de 50mm) contendo o valor do potencial elétrico.

Assim como no estudo do campo magnético, foram calculados os valores de tensão entre fase e neutro em 37 instantes de tempo diferentes, completando um período de tensão. Novamente, foram obtidas as duas componentes do campo, horizontal (E_x) e vertical (E_y), próximas à base do para-raios (cujas altura foi novamente considerada 1,5m e a largura 1,0m). Os passos para a obtenção dos resultados também foram os mesmos utilizados para o campo magnético. Para representar o pedestal, foi utilizado o mesmo modelo, de 1,5m de altura por 1m de largura da base. Novamente, o ponto de leitura adotado foi de 1,6m de altura do solo.

Para simular o aterramento da base, as condições de contorno tiveram de ser introduzidas de modo que no topo do pedestal o potencial seja 0V (mesmo potencial de terra). Com estas considerações, foram obtidos os valores e o comportamento dos campos elétricos nos pontos de estudo. As Figuras 43 e 44 apresentam, respectivamente, o comportamento dos campos para a tensão nula na fase A ($\theta_a = 0^\circ$) e para a tensão máxima ($\theta_a = 90^\circ$) na mesma fase.

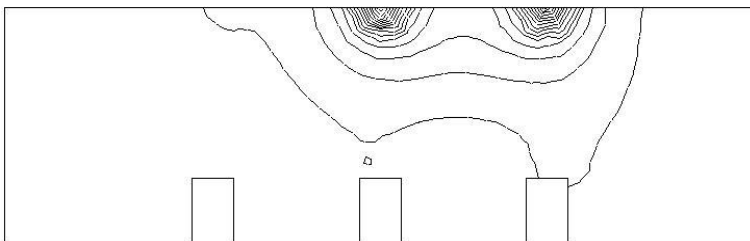


Figura 43 - Distribuição do campo elétrico para tensão nula na fase A

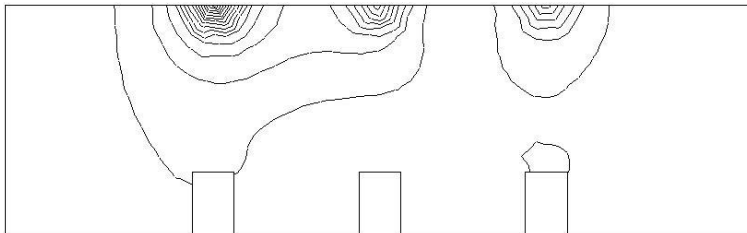


Figura 44 - Distribuição do campo elétrico para tensão máxima na fase A

Da mesma forma que feito nas simulações com a sonda de corrente, em geral, a sonda de campo elétrico é posicionada a uma altura superior à das simulações realizadas. Porém, isso apenas aumentará a intensidade dos campos elétricos, de modo que a situação seja ainda mais crítica que a apresentada.

a) Campo elétrico na fase A

A Figura 45 apresenta os gráficos com os resultados obtidos nas simulações do campo elétrico na fase A para as componentes horizontal (E_x) e vertical (E_y) e sua comparação com a forma de onda da tensão na linha. Na Figura 46 é apresentada a comparação entre as formas de onda das duas componentes.

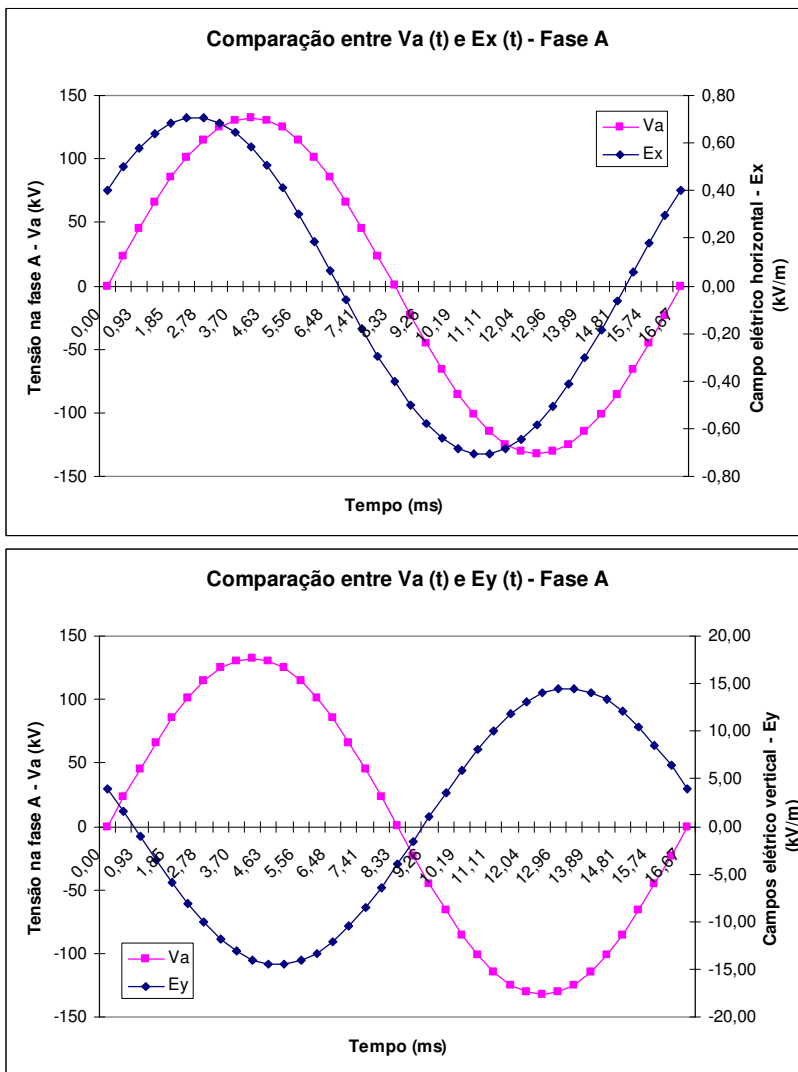


Figura 45 - Defasagem entre tensão de fase e componentes do campo elétrico externo – Fase A

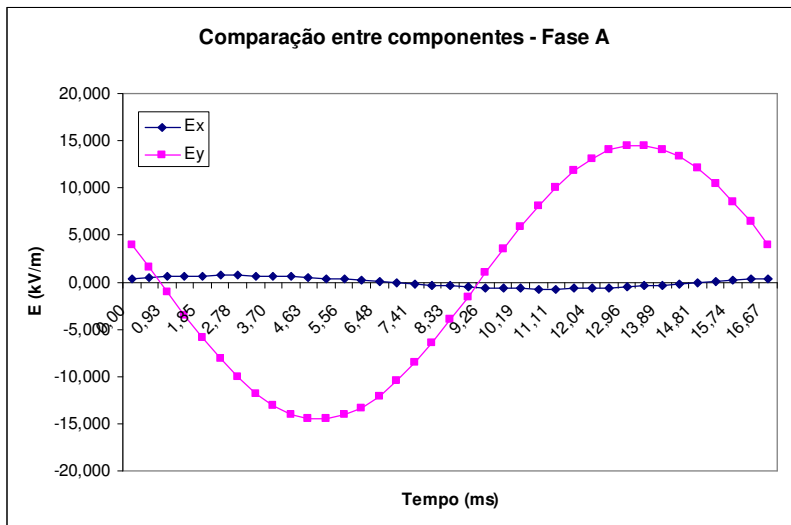


Figura 46 - Comparação entre componentes de campo elétrico – Fase A

Através dos resultados obtidos nas simulações, observa-se que, no local onde é feita a medição, o campo elétrico resultante é defasado em relação à tensão da rede na fase referida. Esta defasagem dos campos pode modificar o resultado da medição nos métodos em que é necessária a utilização da tensão sobre o para-raios, uma vez que a imagem obtida pela sonda é diferente da forma de onda de tensão utilizada nos métodos de medição. Desta forma, as referências de tensão utilizadas pelo método serão diferentes do esperado, tanto em defasagem quanto em amplitude, implicando em possíveis erros na medição da corrente de fuga.

Com relação às componentes de campo elétrico calculadas, observa-se que a amplitude da componente vertical é significativamente maior que a da componente horizontal. Isso ocorre devido ao efeito do aterramento do pedestal, que faz com que o campo elétrico seja perpendicular à sua superfície, onde o potencial é nulo.

b) Campo elétrico na fase B

As Figuras 47 e 48 indicam os campos encontrados no pedestal da fase B e a comparação entre suas componentes.

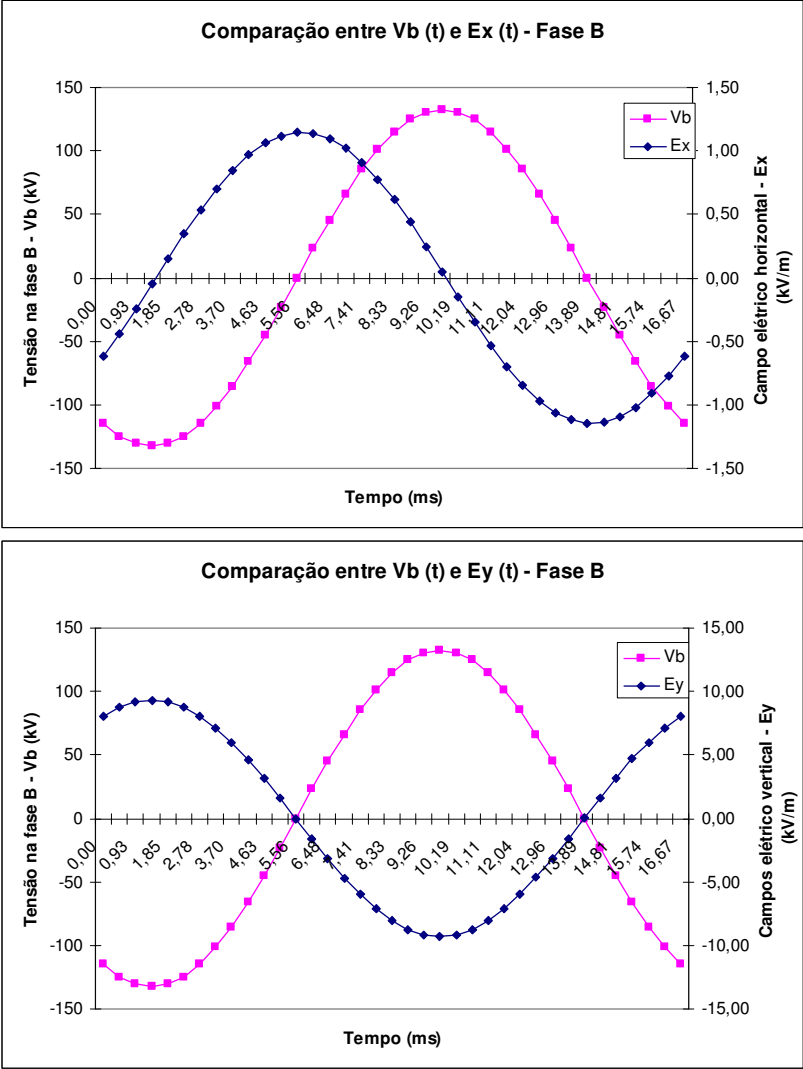


Figura 47 - Defasagem entre tensão de fase e componentes do campo elétrico externo – Fase B

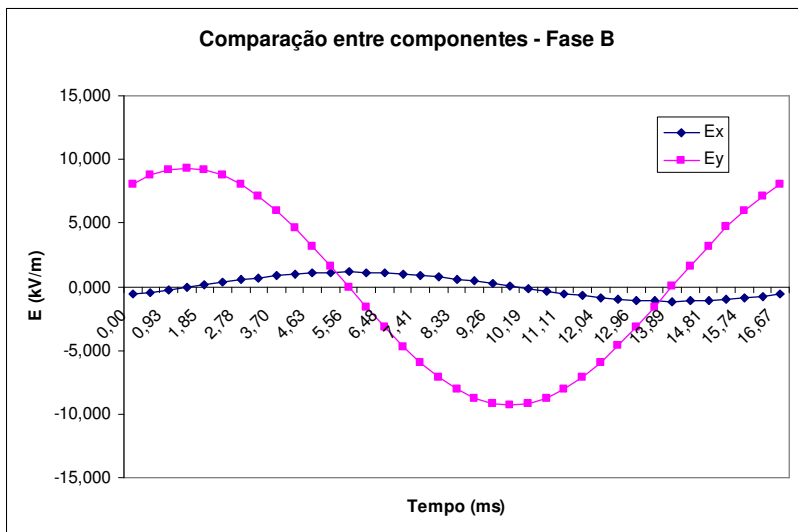


Figura 48 - Comparação entre componentes de campo elétrico – Fase B

Nos resultados apresentados para a Fase B se observa que a componente vertical é novamente maior que a horizontal. Ao se comparar com as simulações na fase A, a componente Ey é de menor amplitude, enquanto a Ex é maior. A defasagem entre as formas de onda da tensão na rede e da componente de campo Ex é praticamente de 90°, e a forma de onda da componente Ey está em quadratura com a forma de onda da tensão.

c) Campo elétrico na fase C

As Figuras 49 e 50 apresentam os resultados encontrados para o pedestal da fase C e a comparação entre as componentes.

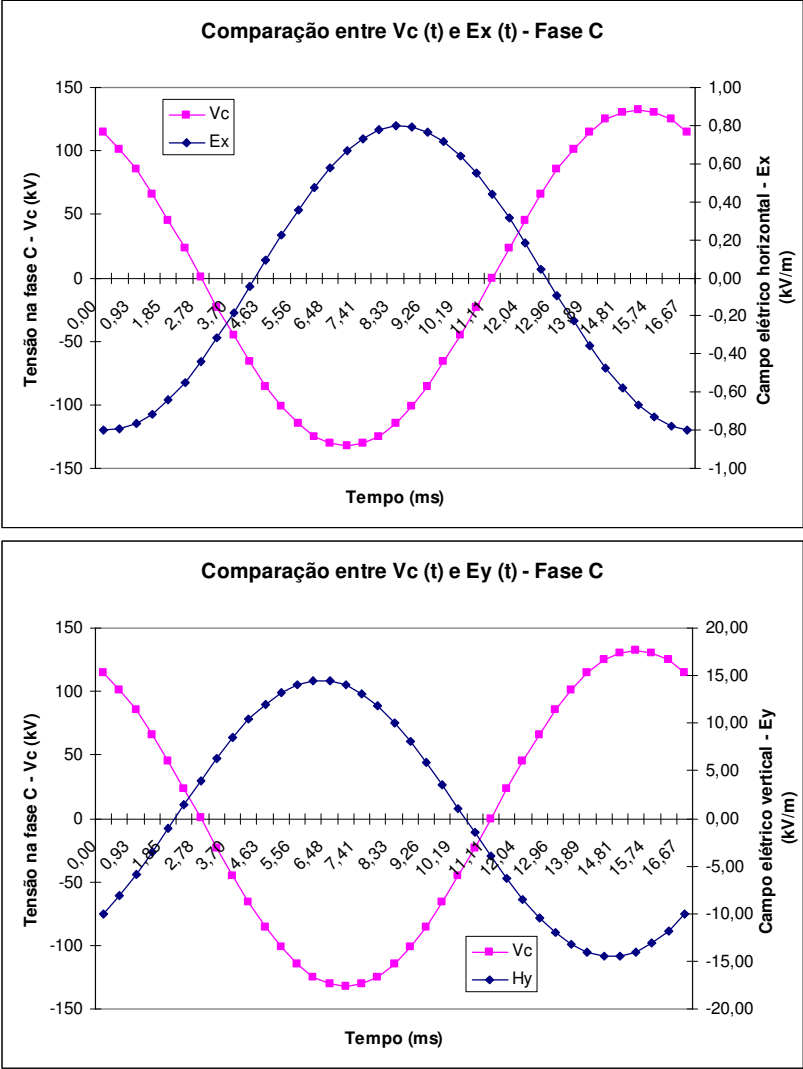


Figura 49 - Defasagem entre tensão de fase e componentes do campo elétrico externo – Fase C

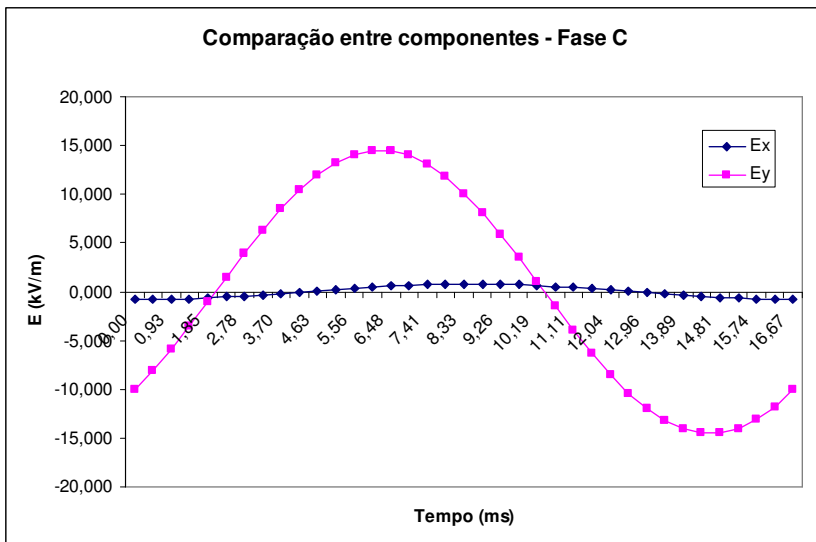


Figura 50 - Comparação entre componentes de campo elétrico – Fase C

A partir das simulações de campo sob a fase C, nota-se uma semelhança com os resultados na fase A. Novamente, há grande diferença entre os valores de pico das duas componentes Ex e Ey.

d) Módulo dos campos elétricos

Foram analisados também os módulos dos campos elétricos, que podem ser vistos na Figura 51. Observa-se que, assim como os módulos dos campos magnéticos, estes em nenhum momento apresentam valor nulo, sempre havendo sua interferência sobre a medição.

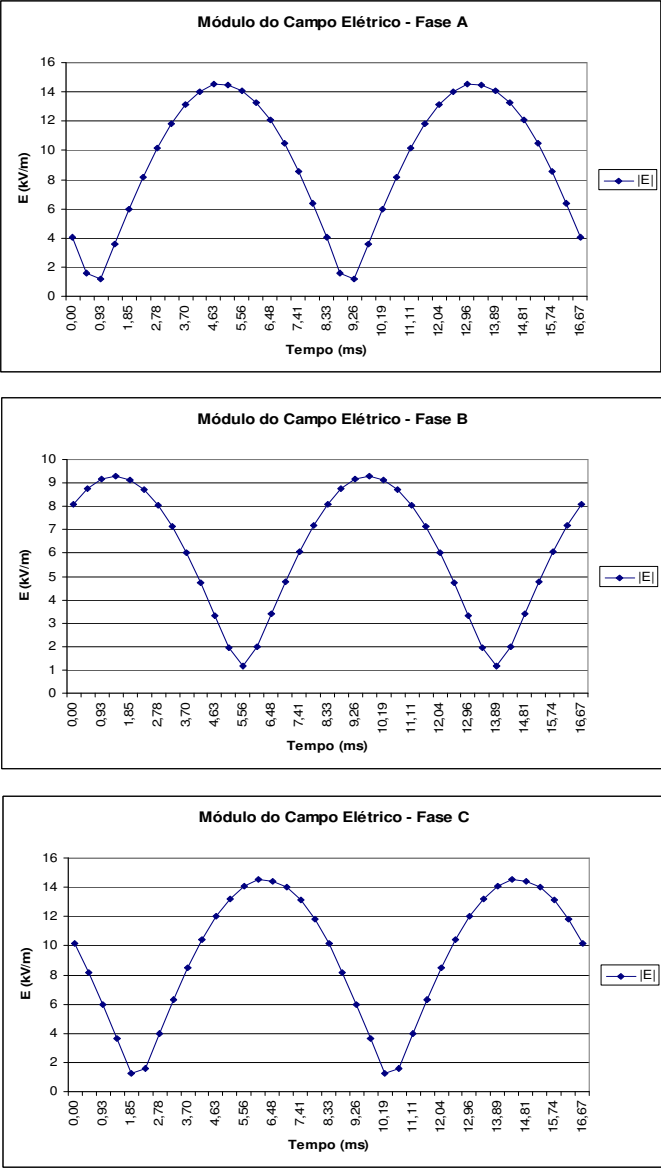


Figura 51 - Módulos dos campos elétricos sob as fases A, B e C

5.4. Considerações gerais

Através da realização dos cálculos de campos criados pelas linhas de transmissão, pode-se notar a existência de campos elétricos e magnéticos externos na base do para-raios, que podem influenciar na medição da corrente de fuga.

A existência do campo magnético externo, em torno de 2000 vezes maior que o campo gerado pela corrente de fuga que se deseja medir, pode se acoplar à sonda, influenciando no valor de corrente apresentado pelo instrumento. A amplitude e a defasagem dos campos externos variam de acordo com a posição no espaço onde é feito o estudo, podendo influenciar de modo diferente cada medição, dependendo de qual para-raios será monitorado.

A partir dos resultados obtidos através de simulações, verificou-se que em nenhum instante de tempo o módulo do campo magnético é nulo. Desta forma, devido ao possível acoplamento entre as parcelas das espiras da sonda de corrente com o campo externo, sua existência não pode ser desconsiderada.

Os campos elétricos externos, causados pela tensão nos condutores da subestação, também podem influenciar na medição da corrente de fuga, principalmente nas técnicas que utilizam a tensão da linha como referência. Os campos elétricos gerados pelos outros condutores se somam ao que se quer medir, de modo que a resultante possua diferentes amplitudes e defasagens, de acordo com o ponto no espaço em que se realiza o estudo. Desta maneira, a forma de onda de tensão captada pelas sondas de campo elétrico é alterada, causando incertezas na medição.

A análise dos campos elétricos e magnéticos externos é importante também devido à possível suscetibilidade do instrumento de medição. Devido à distribuição dos campos, pode ser necessária blindagem dos instrumentos, de modo a evitar interferências e aumentar ainda mais a confiabilidade dos resultados.

No próximo capítulo será apresentado um método desenvolvido para realizar a separação das componentes resistiva e capacitiva a partir das formas de onda da corrente total e da tensão sobre o para-raios obtidas em laboratório. Também será apresentado um programa desenvolvido em LabView a partir deste método.

6. Método para separação das correntes capacitiva e resistiva

6.1. Introdução

Uma das maneiras utilizadas para a obtenção da forma de onda da componente resistiva da corrente de fuga de para-raios de modo mais exato é através da compensação da forma de onda da corrente capacitiva. Ao subtrair a componente capacitiva da corrente de fuga total, é obtida apenas a corrente resistiva. Desta maneira, podem-se analisar as alterações em sua forma de onda e o aumento da presença de harmônicos.

No capítulo 3 foram comentadas algumas técnicas para a compensação da componente capacitiva. Em geral, estes métodos envolvem procedimentos onerosos, complicados, apresentam pouca exatidão e exigem certo tempo para a execução, fazendo com que os ensaios sejam demorados, mesmo em laboratório. Na literatura [27, 28], pode-se encontrar um método para a medição da corrente resistiva em laboratório através da utilização de um circuito para a compensação da componente capacitiva, conforme a Figura 52. Através do ajuste dos resistores, de modo que o sinal de saída esteja em fase com a tensão de alimentação do circuito, apenas a corrente resistiva é detectada. Porém, embora o circuito apresente resultados satisfatórios, há alguns inconvenientes, como a necessidade de ajuste dos parâmetros a cada aquisição de sinais e a dificuldade para se ajustar o sinal de saída de modo a ficar em fase com a tensão através de análise visual.

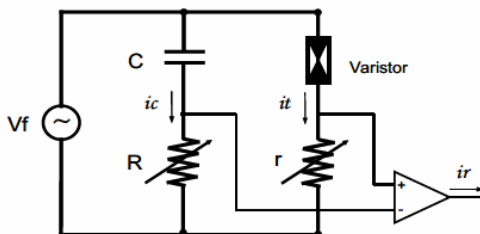


Figura 52 - Circuito para medição da corrente resistiva [27]

Neste capítulo será apresentada uma outra metodologia para a separação das componentes da corrente de fuga a partir das formas de onda da corrente de fuga total e da tensão sobre o para-raios, eliminando a necessidade de se utilizar circuito ou fazer aproximações. Também

será mostrado um instrumento virtual criado em LabView que realiza esta separação, apresentando como resultados a forma de onda da corrente resistiva de fuga, assim como seus valores de pico, eficaz, conteúdo harmônico e a capacitância equivalente do para-raios. A partir dos resultados fornecidos pelo programa, são apresentadas análises da corrente de fuga medida em laboratório de para-raios da ELETROSUL retirados de operação.

6.2. Método para separação da corrente resistiva

No circuito equivalente simplificado de um para-raios de ZnO, apresentado na Figura 6 da seção 2.3.2, a corrente de fuga total do para-raios é considerada a soma das correntes resistiva e capacitiva. O método utilizado para a obtenção da forma de onda da corrente resistiva consiste em, primeiramente, encontrar a componente capacitiva, para que esta possa ser subtraída da corrente de fuga total, conforme apresentado pela equação (6.1).

$$i_r(t) = i_t(t) - i_c(t) \quad (6.1)$$

Para a obtenção da forma de onda da corrente capacitiva no tempo ($i_c(t)$), é necessária a obtenção do valor da máxima corrente capacitiva (I_{cmax}) que atravessa o para-raios. Como as componentes resistiva e capacitiva estão defasadas em 90° , o valor de pico da corrente capacitiva pode ser obtido no ponto em que a corrente resistiva for nula. Pela Lei de Ohm, a corrente resistiva é nula quando a tensão também for, sendo que o valor da corrente total encontrado neste ponto é igual a I_{cmax} . A partir do valor de pico da corrente capacitiva encontrado, pode-se calcular a reatância conforme a equação (6.2)

$$X_c = \frac{V_{ef}}{\frac{I_{cmax}}{\sqrt{2}}} \quad (6.2)$$

A capacitância do para-raios pode ser então calculada por meio de (6.3).

$$C_p = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (6.3)$$

A partir da derivada da forma de onda da tensão e da capacitância previamente calculada, é possível se calcular a corrente capacitiva de fuga em função do tempo utilizando a equação (6.4).

$$i_c(t) = C_p \frac{dV}{dt} \quad (6.4)$$

Aplicando os valores calculados da corrente capacitiva a partir da equação (6.4) na equação (6.1), encontra-se a forma de onda da corrente resistiva em função do tempo. A partir desta forma de onda, podem ser encontrados os valores de pico e eficaz da corrente resistiva, além das amplitudes das componentes harmônicas. Através deste método, na equação (6.3), pode-se também obter o valor da capacitância do para-raios.

6.3. Programa de separação das correntes

A partir do método para separação da corrente resistiva apresentado na seção 6.2, foi feito um programa em LabView que realiza a separação da componente resistiva da corrente total de fuga a partir de um arquivo CSV (*comma separated value*, arquivo de saída de osciloscópios em geral) com as formas de onda da corrente total e da tensão aplicada sobre o para-raios.

O programa criado primeiramente lê o arquivo CSV e separa as componentes (tempo, corrente total e tensão). As formas de onda de corrente e tensão passam então por um filtro passa-baixas, removendo as componentes de alta frequência. A frequência de corte do filtro pode ser escolhida pelo usuário. Por fim, é feito o equacionamento apresentado anteriormente.

Como saídas, o programa fornece a curva da corrente total, a curva da corrente resistiva e a porcentagem de harmônicas. Através do tratamento das formas de onda resultantes, é possível a obtenção dos valores de pico e eficazes das correntes total e resistiva, os valores dos harmônicos da corrente total, além do valor da capacitância do para-raios. A Figura 53 apresenta o fluxograma do programa.

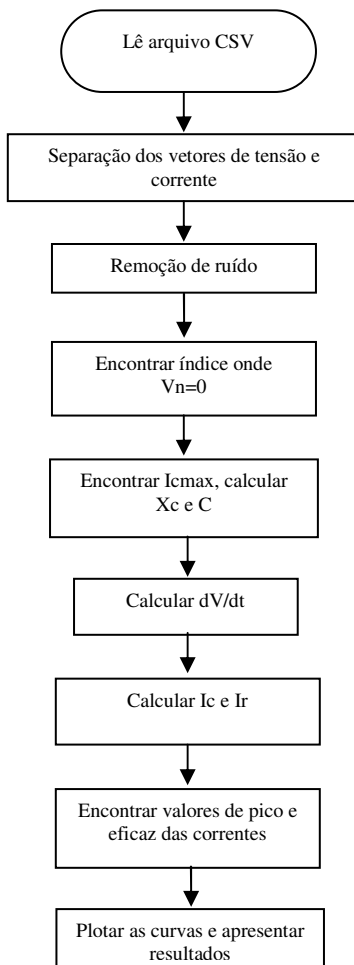


Figura 53 - Fluxograma do programa desenvolvido em Labview

Com o apoio do Laboratório de Alta Tensão da ELETROSUL (LALTE), diversas formas de onda da tensão aplicada e da corrente de fuga foram obtidas e armazenadas com a ajuda de osciloscópios. Desta forma, foi possível utilizar o programa com valores de para-raios reais, obtendo suas curvas de corrente resistiva para diversas tensões de operações diferentes.

Com relação à utilização do programa, recomendou-se que os arquivos CSV possuam, no máximo, 10 mil pontos, uma vez que, com um maior número de pontos, o tempo de execução pode se tornar excessivamente longo. Convencionou-se também que, para o arquivo CSV de entrada, a corrente de fuga medida pelo osciloscópio deve estar no canal 1, e a tensão no canal 2.

Para demonstrar a aplicabilidade do programa, foi utilizado um para-raios cuja tensão nominal é de 120kV e a tensão de operação contínua é 96kV. A Figura 54 apresenta a visualização dos resultados obtidos através do programa para o referido para-raios sob a tensão de 30kV.

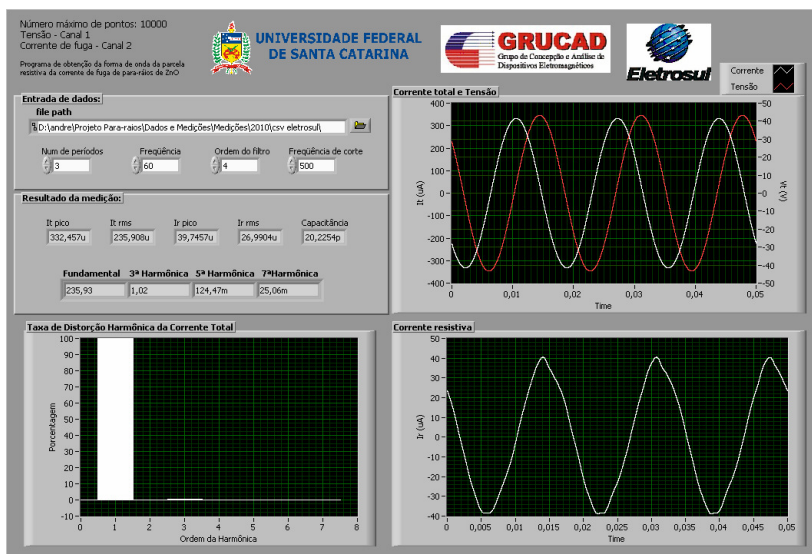


Figura 54 - Painel frontal do programa de separação de correntes – 30kV

Quando sob uma tensão de 30kV, a corrente resistiva apresenta baixa amplitude e taxa de distorção harmônica. Pelo fato de o varistor estar operando em uma região de linear, a baixa taxa de distorção harmônica é observada através da pequena distorção na forma de onda da corrente resistiva. Conforme esperado, a forma de onda da corrente total apresenta pouca distorção e está defasada em aproximadamente 90° com relação à da tensão. Analisando os valores absolutos de corrente, observa-se que a porcentagem de terceiro harmônico na corrente total nesta tensão é abaixo de 1%.

A Figura 55 apresenta as saídas do programa para o mesmo para-raios, porém, sob uma tensão de 90kV. Desta forma, é possível a comparação da forma de onda da corrente resistiva do para-raios.

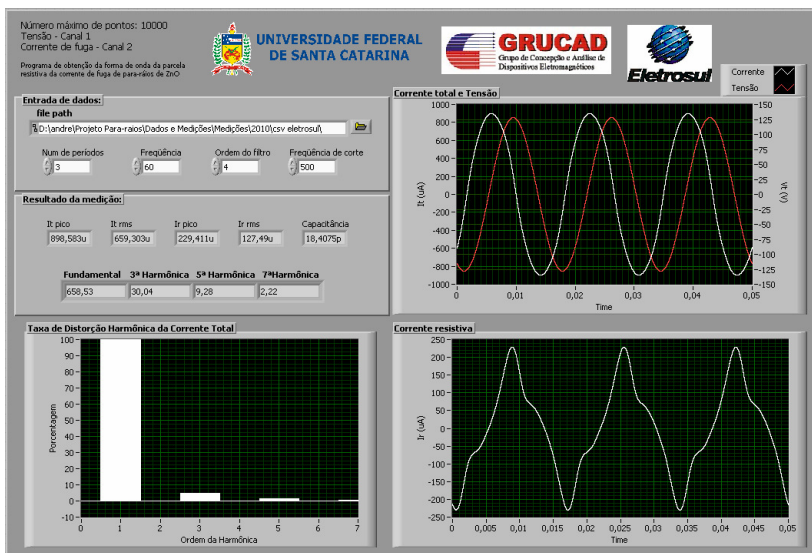


Figura 55 - Painel frontal do programa de separação de correntes – 90kV

Para a tensão de 90kV, observa-se que há o aumento das componentes harmônicas na corrente resistiva de fuga, de modo que sua forma de onda seja visivelmente distorcida. Novamente, a corrente de fuga total apresenta pouca distorção em sua forma de onda, conforme esperado. Com relação à análise harmônica, observa-se que, sob a tensão de 90kV, a quantidade de terceiro harmônico na corrente de fuga total aumenta para aproximadamente 4%, uma vez que a operação do varistor é realizada em um ponto de maior não-linearidade.

A Tabela 6.1 apresenta os valores de corrente medidos e a capacitância obtida para diversos valores de amplitude de tensão aplicadas sobre o mesmo para-raios em laboratório.

Tabela 6.1 – Valores de corrente obtidos através do programa para um para-raios real

Tensão (kV)	It pico (uA)	It rms (uA)	Ir pico (uA)	Ir rms (uA)	3ª harm. Rms (uA)	Cp (pF)
30	332,457	235,908	39,7457	26,9904	1,02	20,2254
60	635,138	453,376	94,1898	59,8341	6,10	19,4399
70	720,733	517,448	119,811	73,8959	9,83	19,0341
80	820,3	593,389	168,781	97,9285	17,98	18,6839
90	898,583	659,303	229,411	127,49	30,04	18,4075

Com a variação na tensão de entrada, há o aumento da corrente de fuga. Analisando apenas a corrente total, nota-se que este aumento apresenta um comportamento quase linear, com a corrente aumentando quase na mesma proporção da tensão. Já as correntes resistiva e a de terceiro harmônico apresentam comportamento exponencial, não aumentando na mesma proporção que a tensão aplicada sobre o para-raios. Observa-se também que, com a variação da tensão sobre o para-raios, a capacitância é alterada, chegando a um decréscimo de aproximadamente 10% para a tensão mais alta.

As Figuras 56, 57 e 58 apresentam, respectivamente, os valores de pico da corrente total e da resistiva e o valor eficaz da terceira harmônica em função da tensão.

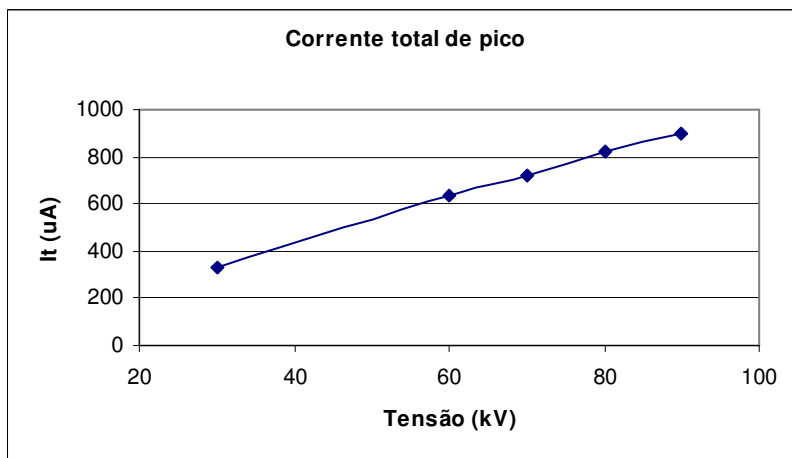


Figura 56 - Corrente total de pico em função da tensão aplicada sobre o para-raios

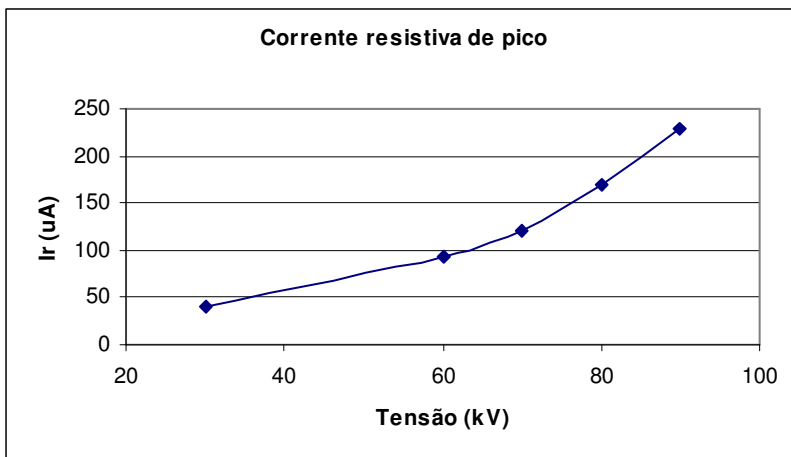


Figura 57 - Corrente resistiva de pico em função da tensão aplicada sobre o para-raios

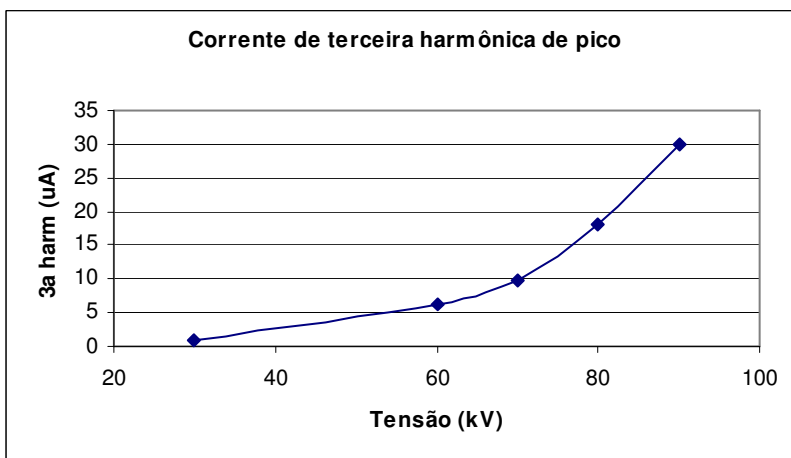


Figura 58 - Corrente de terceiro harmônico em função da tensão aplicada sobre o para-raios

6.4. Influência de harmônicos da tensão sobre as correntes de um para-raios

As medições realizadas com o apoio do LALTE foram de para-raios retirados de serviço por apresentarem indícios de problemas, sinalizados por instrumentos de medição de corrente de fuga. Desta forma, através do programa de separação de correntes, é possível a obtenção da curva $V \times I_r$ dos para-raios, possibilitando nova análise da influência de harmônicos na tensão da rede sobre as medições, apresentada na seção 4.2.

Para este estudo foi utilizado para-raios diferente do utilizado na seção 6.3, com tensão nominal de 192kV e tensão de operação contínua de 150kV. A Tabela 6.2 apresenta os valores de tensão, valores de pico e eficazes das correntes total e resistiva e o valor eficaz da componente de 3º harmônico da corrente total, obtidos através dos ensaios.

Tabela 6.2 – Valores de corrente medidos – PR7300064

Tensão (kV)	Resultado programa separação [uA]				Cap. (pF)
	It pico	It rms	Ir pico	3ª harm	
50	455,27	322,52	54,82	0,77	16,548
80	724,16	514,46	92,04	2,8	16,548
100	892,325	635,19	121,65	5,28	16,24
110	953,539	680,16	133,89	6,7	16,064
120	1041,8	744,53	154,43	9,27	15,944
130	1116	799,02	175,39	12,05	15,806
140	1206,6	867,04	208,32	17,21	15,630
150	1234,9	888,47	222,92	19,45	15,509
160	1344,56	975,86	291,02	32,04	15,366

Para o estudo da presença de harmônicos na rede, foi necessária a descoberta dos parâmetros (a , β , U_m) a partir da curva $V \times I_r$, através do instrumento virtual desenvolvido por James Silveira [3]. Os parâmetros obtidos para este para-raios foram:

$$a = 77,8732$$

$$U_m = 1,147934$$

$$\beta = 5,36149$$

As simulações foram realizadas para uma tensão de 150kV (tensão de operação contínua), analisando as variações nos valores de corrente resistiva e no 3º harmônico da corrente total em três casos diferentes:

- Sem harmônico na rede
- 1% de 3º harmônico sem defasagem
- 1% de 3º harmônico com defasagem de 180º

Diferentemente das simulações realizadas na seção 4.2, serão analisados os aumentos causados devido à inserção de conteúdo harmônico na rede sobre as correntes resistiva de pico e 3ª harmônica eficaz da corrente total. Desta maneira, o valor obtido sem a inserção de harmônicos na tensão será tomado como referência. A Tabela 6.3 apresenta os valores de corrente obtidos nas simulações em cada situação e o aumento percentual de cada valor.

Tabela 6.3 – Valores de corrente harmônica obtidos

	Correntes (uA)		Diferença (%)	
	Ir pico	3ª harm It rms	Ir pico	3ª harm It rms
Sem harm. na rede	236,48	16,25	0	0
1% de 3o harm sem def	229,66	27,99	-2,88396	72,2461538
1% de 3o harm com def	243,64	31,15	3,02774	91,6923077

Observa-se que, conforme esperado, com a existência de harmônicos na tensão da rede, há uma pequena variação na corrente resistiva de pico, chegando a no máximo 3%. A componente de 3ª harmônica da corrente total, por outro lado, apresenta um aumento de 91%. Esses resultados, já observados na seção 4.2, eram esperados, uma vez que a existência de harmônicos na tensão de rede gera também harmônicos capacitivos.

Tomando como exemplo os casos com a adição de 1% de 3º harmônico com defasagem, analisando os resultados da Tabela 6.3, observa-se que o aumento na corrente de terceiro harmônico da corrente total, é de 91%. Ao se analisar o resultado apresentado na seção 4.2, na Tabela 4.1, naquele caso o aumento foi de mais de 300%. Analisando os resultados, observa-se que a influência das harmônicas sobre o sistema depende também do para-raios utilizado, e não somente da amplitude das harmônicas na tensão.

6.5. Considerações gerais

A partir da compensação da componente capacitiva da corrente de fuga total, é possível se obter a forma de onda da corrente resistiva de fuga, possibilitando a análise da variação desta componente e a avaliação do estado do para-raios.

Através do método para a separação das componentes da corrente de fuga apresentado neste capítulo, é possível realizar o tratamento da forma de onda da corrente resistiva, obtendo seu valor de pico, eficaz e os harmônicos da corrente.

A obtenção das formas de onda da corrente resistiva e da corrente total possibilita verificar fenômenos já comentados, como o fato de a corrente total ser predominantemente linear e o aumento da taxa de distorção harmônica com o aumento da tensão. Devido à não-linearidade do varistor, a corrente resistiva, assim como a componente de terceira harmônica, apresenta crescimento exponencial com o aumento da tensão. O aumento da tensão sobre o para-raios também causou a diminuição da capacitância do equipamento, chegando a diminuir em 10% com relação a seu valor inicial.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados de medições de corrente de fuga em campo com o para-raios energizado durante o período de uma manhã, com variações de amplitude de tensão, temperatura e umidade relativa do ar, analisando a sensibilidade na variação dos valores de corrente de fuga total e da terceira harmônica medidos com relação aos fatores citados.

7. Análise de medições

7.1. Introdução

A variação na amplitude de tensão energizando o para-raios e na temperatura ambiente ao longo do dia pode alterar o valor da corrente de fuga medida [23]. Deste modo, o aumento da corrente de fuga de um para-raios pode ocorrer devido a estes fatores, e não necessariamente à degradação do equipamento. Além disso, a umidade relativa do ar pode modificar a capacitância do para-raios, alterando o valor da corrente de fuga total.

Através da medição de corrente de fuga *on-line* de para-raios em campo, é possível analisar o quanto os fatores externos atuando simultaneamente influenciam na variação do valor obtido.

Neste capítulo são apresentadas medições realizadas em subestação durante o período de uma manhã, em um dia com grande variação de temperatura e umidade relativa do ar, analisando os resultados obtidos através do uso de um instrumento de medição de corrente de fuga comercial. Serão também sugeridos alguns procedimentos para a padronização do processo de medição de corrente de fuga, de modo a diminuir as influências externas, aumentando a confiabilidade nos resultados.

7.2. Medições em campo

Nos capítulos 4 e 5 foram descritos e estudados, de maneira isolada, diversos fatores que podem influenciar na medição da corrente de fuga do para-raios de ZnO em uma subestação de alta tensão. A medição da corrente de fuga em campo permite que se verifique a variação nos valores medidos sob as diversas influências externas simultaneamente.

Devido à disponibilidade de instrumentos de medição, foi apenas utilizado o instrumento B da Tabela 5.1, que realiza apenas a medição da corrente total e de sua componente de 3ª harmônica, sem compensação de harmônicos de rede ou correção com relação a qualquer fator externo.

Nas simulações apresentadas no capítulo 4, se verificou que a componente de 3ª harmônica da corrente de fuga total é pouco sensível à variação de temperatura. Entretanto, na presença de harmônicos na tensão da rede, essa componente pode ser um indicativo pouco confiável, sendo teoricamente necessária a sua compensação. Através

das medições em campo, é possível comprovar se a sensibilidade desta componente com relação à variação de temperatura ambiente e tensão na linha condizem com o verificado nas simulações.

Durante a execução das medições em campo, se verificou que a movimentação do instrumento, mesmo com a sonda de corrente fixa no cabo de aterramento, variava o valor de corrente apresentado pelo mesmo. Isso ocorre devido à susceptibilidade do instrumento aos campos elétricos presentes no ambiente. Para evitar este problema, pode-se aterrar o instrumento ou apenas mantê-lo posicionado sobre o solo, onde os campos são menos intensos. Para as medições apresentadas, foi utilizado o segundo método, posicionando o instrumento sobre o solo em uma mesma posição durante todo o período de medição.

As medições em campo apresentadas foram realizadas apenas no para-raios referente à fase C, em uma linha de 138kV. A Tabela 7.1 apresenta os valores de corrente de fuga total e de sua componente de 3ª harmônica medidos, a tensão sobre o para-raios, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.

Tabela 7.1 – Variação nos valores de corrente medidos ao longo do dia

	It [μ A]	I 3 ^a Harm. [μ A] f=180Hz	Horário	Tensão [kV]	Temp. [$^{\circ}$ C]	UR (%)
Med. 1	465	20	06:11	142,4	20,4	85,7
Med. 2	464	20	06:12	142,4	20,1	
Med. 3	466	20	06:17	142,4	19,8	88
Med. 4	474	20	06:28	144,1	20	84,5
Med. 5	466	20	06:42	144,1	20,3	86,5
Med. 6	459	19	07:08	143,2	20,7	87,5
Med. 7	465	19	07:36	143,5	20,5	85
Med. 8	465	19	07:51	143,5	20,8	81
Med. 9	465	19	08:05	143	21,7	79,3
Med. 10	467	19	08:30	143	22,4	77
Med. 11	467	19	09:00	142,7	24,4	70
Med. 12	466	19	09:09	142,7	25	67,5
Med. 13	464	19	09:25	141,5	28	
Med. 14	466	19	09:34	141,5	29,5	
Med. 15	467	19	09:42	141,9	30	56
Med. 16	469	19	10:00	141,9	26	58
Med. 17	470	19	10:18	141,8	28	55
Med. 18	474	19	10:30	141,8	29,7	51,3
Med. 19	476	20	10:51	141,8	30,9	47,3
Med. 20	476	20	11:00	142,8	32,7	46
Med. 21	478	20	11:12	142,8	32,1	46
Med. 22	478	20	11:24	142,8	31,8	45,6
Med. 23	482	20	11:35	143,4	31,1	
Med. 24	483	20	11:45	143,4	30,8	
Med. 25	484	20	11:57	143,4	29	50
Med. 26	485	20	12:05	143,4	29	48
Med. 27	488	20	12:20	144,1	30	50

Observa-se que, durante o período analisado, houve variação de cerca de 12°C, sendo que o maior valor de temperatura ocorreu durante a Med. 21, diminuindo nas medições seguintes. A umidade relativa do ar diminuiu significativamente com o passar do tempo, aumentando um pouco durante as últimas medições, variando entre 88% e 45%. A tensão aplicada sobre o para-raios foi entre 141,5 kV e 144,1 kV, o que representa uma variação de aproximadamente 2%. As Figuras 59 e 60 apresentam as variações de temperatura e umidade relativa do ar ao longo das medições.

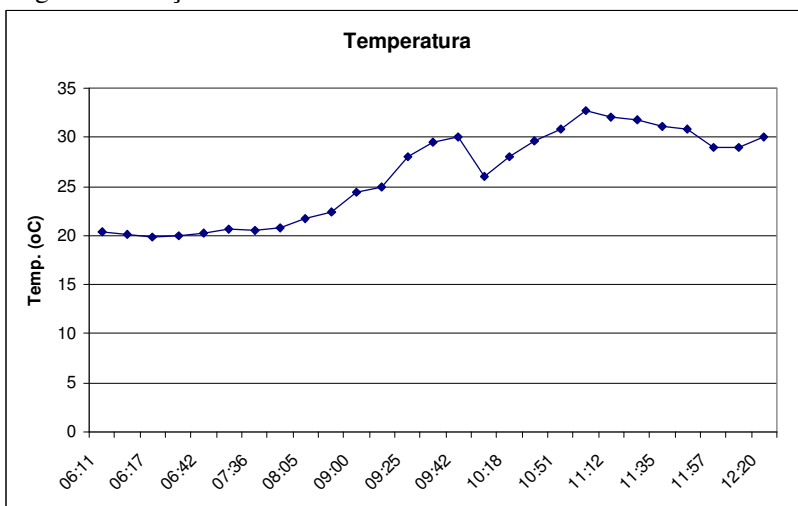


Figura 59 - Variação da temperatura durante as medições

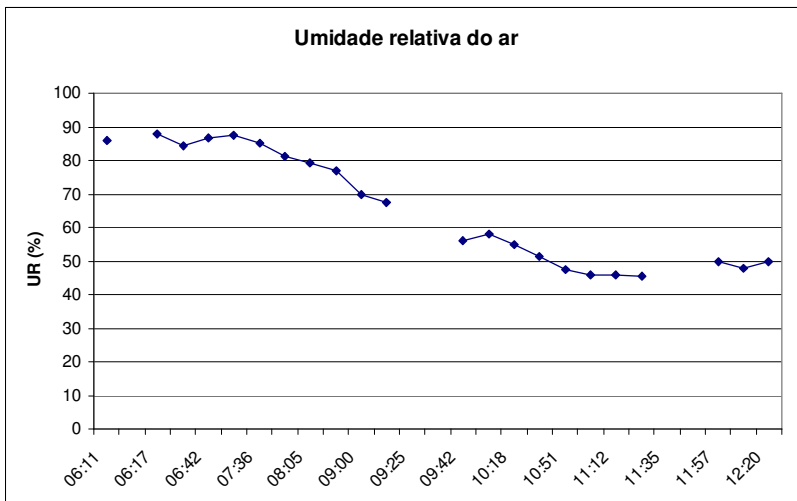


Figura 60 - Variação da umidade relativa do ar durante as medições

As variações nos valores de corrente de fuga total e na sua componente de 3^a harmônica podem ser observadas, respectivamente, nas Figuras 61 e 62. Com o passar da manhã, o valor de corrente total medido variou entre 459uA e 488uA (6,3% de variação). O valor da componente de 3^a harmônica da corrente de fuga não variou significativamente, tendo os valores medidos entre 19uA e 20uA, na mesma ordem de grandeza, e não indicando erroneamente degradação do para-raios.

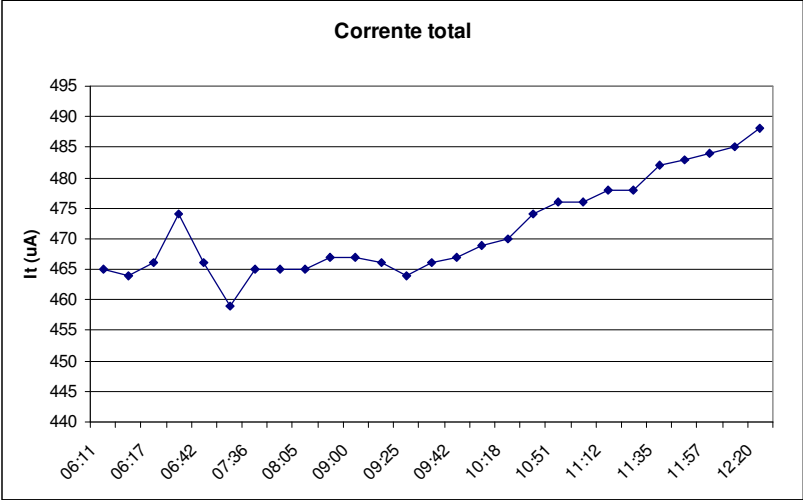


Figura 61 - Corrente de fuga total medida

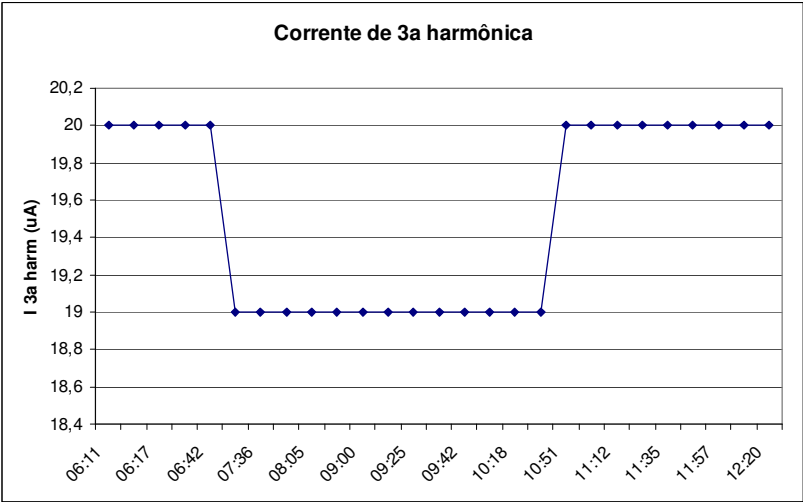


Figura 62 - 3ª harmônica da corrente de fuga total medida

Apesar das diferenças verificadas na temperatura, tensão e umidade relativa do ar durante o período de medição, a componente de 3ª harmônica da corrente, valor mais importante a ser utilizado em uma metodologia de avaliação da degradação de para-raios, praticamente não

se alterou durante todo o período dos testes, mesmo sem a compensação de possíveis harmônicos na tensão da rede.

Entretanto, a corrente de fuga total apresentou variação nos valores medidos. Com o aumento de temperatura durante a manhã, se verifica o acréscimo na corrente de fuga. Porém, ao final da manhã, se observa que, embora a corrente total continue aumentando, há a diminuição da temperatura. Isso pode ocorrer devido à constante térmica do encapsulamento do para-raios, de cerâmica, de modo que a temperatura dos varistores seja diferente da temperatura ambiente externa. A umidade relativa do ar também pode ser fator de influência na variação da corrente total. Com a diminuição da umidade relativa do ar, há a diminuição de sua permeabilidade elétrica, o que pode diminuir a capacitância e, conseqüentemente, a componente capacitiva da corrente de fuga.

Observa-se que a componente de 3ª harmônica da corrente total, mesmo sem compensação de harmônicos e correções com relação à corrente e tensão, é pouco sensível às variações que podem influenciar na avaliação do para-raios. De acordo com as simulações apresentadas no capítulo 4, a distorção harmônica na tensão da rede poderia causar imprecisão no valor medido. Entretanto, se verifica que esta distorção da forma de onda na rede, na prática, é de ordem menor que a simulada, não influenciando significativamente na medição. Isso pode ser verificado na Figura 63, que apresenta os resultados de outra medição da corrente de fuga total e de sua componente de 3º harmônico realizadas no para-raios referente à fase B de outra linha de transmissão, sendo esta de 230kV. Observa-se que a componente de 3ª harmônica varia de maneira diferente da corrente total, podendo este efeito acontecer devido à existência de harmônicos na rede. Entretanto, mesmo com a variação na corrente de 3ª harmônica a cada medição, os valores estão na mesma ordem de grandeza (entre 22μA e 25 μA), não indicando erroneamente o estado de degradação do para-raios.

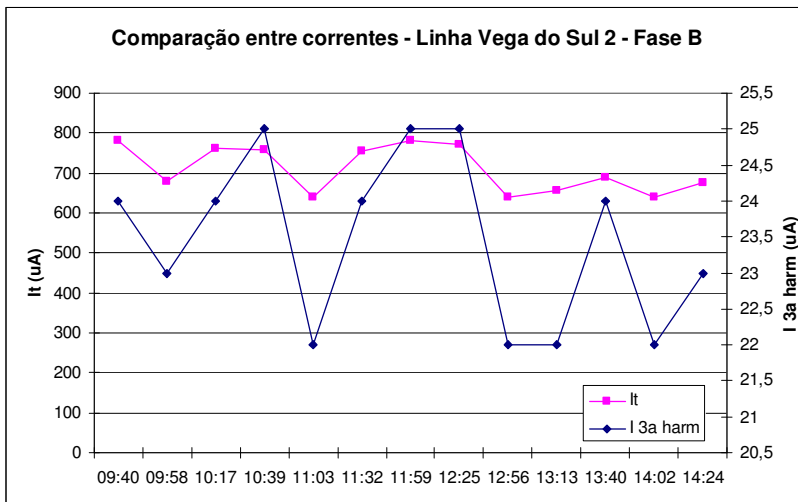


Figura 63 - Comparação entre correntes em linha de alto conteúdo harmônico

7.3. Sugestões de padronização das medições de corrente de fuga

Para aumentar a confiabilidade nos resultados das medições de corrente de fuga de para-raios ZnO, as influências externas devem ser minimizadas. Para isso, sugerem-se alguns cuidados na realização da medição, de modo a padronizar os ensaios, facilitando a visualização da variação do valor da corrente de fuga e a avaliação do estado do para-raios.

Na realização de medições de corrente de fuga com o para-raios energizado, a sonda de corrente deve ser posicionada acima do contador de surto. Caso o instrumento possua sonda de campo elétrico, esta deve ser posicionada na altura da base do para-raios e embaixo dos condutores da fase referente ao para-raios medido. Ao posicionar as sondas sempre nos mesmos locais, a influência dos campos elétricos e magnéticos serão as mesmas, possibilitando uma comparação entre valores medidos em ocasiões diferentes.

O campo elétrico externo gerado pela tensão nos condutores da linha também pode causar imprecisão no valor de corrente fornecido caso o instrumento de medição seja susceptível. Desta forma, recomenda-se que os instrumentos sejam deixados sobre o solo, onde o

campo elétrico é menos intenso, para que não haja erro na leitura dos valores. Também é recomendado evitar o contato do instrumento com o corpo do operador, o que pode modificar o campo elétrico em torno do aparelho, também alterando o valor da medição.

As medições de corrente de fuga devem ser realizadas de preferência em dias mais secos, uma vez que a umidade do ar pode influenciar na medição. Para minimizar os efeitos da variação de temperatura, recomenda-se que as medições sejam realizadas no período da manhã, quando o equipamento está em uma temperatura próxima da ambiente. Embora nos ensaios realizados a componente de terceira harmônica apresente baixa sensibilidade a esses fatores, sugere-se que sejam tomados os mesmos cuidados na sua medição, de modo a seguir um padrão e evitar variação, por menor que seja, no valor medido.

Para o acompanhamento contínuo do aumento da corrente de fuga, se recomenda a utilização de um banco de dados contendo os valores das medições periódicas, comparando os resultados de corrente medida com resultados anteriores, avaliando o crescimento das correntes.

7.4. Considerações gerais

Nos capítulos 4 e 5 foram apresentados estudos, através de simulações, de diversos fatores que podem interferir na medição da corrente de fuga do para-raios de ZnO, como variação da temperatura ambiente, da amplitude da tensão, existência de harmônicos na forma de onda da tensão da rede e os campos elétricos e magnéticos presentes na subestação. Ao sofrer a influência de um ou mais destes fatores, pode haver variação na corrente de fuga que atravessa o para-raios, de modo a indicar erroneamente degradação no equipamento. Além disso, o instrumento utilizado para a realização da medição também pode sofrer influências na precisão da leitura do valor da corrente de fuga do para-raios.

Na prática, ao se realizarem medições da corrente de fuga total e da componente de terceira harmônica durante um período do dia com grande variação dos fatores mencionados, observaram-se alterações apenas na corrente total medida. A componente de terceira harmônica da corrente total, que pode ser utilizada como indicativo para a avaliação do para-raios, se mostrou menos sensível à influência dos parâmetros estudados, inclusive à existência de harmônicos na tensão da rede, podendo ser utilizado, na prática, como indicativo do estado do para-

raios, mesmo quando a compensação da componente capacitiva não pode ser realizada.

Para que a confiabilidade das medições seja aumentada, podem-se realizar alguns procedimentos, como posicionar as sondas e os instrumentos de medição em locais pré-definidos e fazer a medição no período da manhã, quando a temperatura do para-raios está em equilíbrio com a temperatura ambiente, e dias mais secos. Desta forma, pode-se padronizar os ensaios, realizando-os em condições semelhantes e minimizando os efeitos externos, aumentando a segurança dos resultados e da avaliação do para-raios.

8. Considerações finais

Os para-raios de ZnO têm sido largamente utilizados em sistemas de potência na proteção contra sobretensões atmosféricas e de manobra. São equipamentos continuamente submetidos à tensão de operação normal do sistema, e eventualmente às sobretensões que possam ocorrer. Diversos fatores, como perda da estanqueidade, penetração de umidade e a própria atuação do equipamento, podem contribuir para sua degradação. Dada a importância do equipamento, é necessária sua constante avaliação, de modo que se evitem perda de receita e maiores danos ao sistema elétrico, sendo uma das técnicas utilizadas a medição da corrente de fuga do para-raios.

A deterioração das propriedades dos varistores do para-raios acarreta no aumento da componente resistiva da corrente de fuga, sendo que o valor desta componente pode ser utilizado como indicativo do estado em que se encontra o equipamento. Devido à não-linearidade dos varistores de ZnO, caso não existam componentes harmônicas na tensão da rede, toda a distorção harmônica da corrente de fuga total se dá devido à componente resistiva. Desta forma, as componentes harmônicas da corrente de fuga total também podem ser utilizadas como indicativo do estado de degradação do para-raios. Entretanto, a existência da distorção na tensão da rede gera também harmônicos capacitivos, se somando aos harmônicos resistivos, sendo teoricamente necessária sua compensação para a obtenção de um resultado confiável. Diversas técnicas podem ser encontradas para a medição de corrente de fuga, sendo a avaliação através da medição da componente de 3ª harmônica da corrente de fuga total com compensação da componente capacitiva considerado o mais confiável. A componente resistiva da corrente de fuga possui alta dependência com relação à temperatura ambiente, sendo teoricamente necessária a correção com relação a esses valores.

Através de estudos teóricos realizados por meio de simulações de varistores de ZnO, foi verificado que a presença de harmônicos na tensão da rede causa um aumento relativamente pequeno na corrente resistiva medida. Por outro lado, verificou-se um aumento significativo na componente de 3ª harmônica da corrente total, podendo teoricamente inviabilizar o método de avaliação através da medição desta componente caso não se faça a compensação dos harmônicos da rede. Observou-se também que o aumento da amplitude da tensão faz com que o varistor opere em um grau de maior não-linearidade, aumentando as

componentes harmônicas, sendo teoricamente necessária sua correção, de modo a se comparar valores de correntes de medições realizadas sob amplitudes de tensão diferentes. Com o aumento da temperatura a que o para-raios está submetido há uma variação significativa na corrente resistiva obtida através da simulação. Entretanto, a componente de 3ª harmônica da corrente de fuga apresenta menor sensibilidade, apresentando menor variação em seus valores frente o aumento da temperatura.

Com a simulação dos campos criados pelas linhas de transmissão, através do método dos elementos finitos, nota-se a existência de campos elétricos e magnéticos externos na altura da base do para-raios, de diferentes amplitudes e defasagens de acordo com a posição, que podem influenciar na medição da corrente de fuga. O campo magnético externo, significativamente maior que o gerado pela corrente de fuga, pode se acoplar à sonda de corrente, influenciando no valor apresentado pelo instrumento. O campo elétrico, defasado com relação à forma de onda da tensão na linha, pode influenciar na medição de instrumentos que utilizem sonda de campo elétrico para a compensação da corrente capacitiva. Pelo fato de as defasagens do campo elétrico com relação à forma de onda de tensão, sinal que se deseja obter, serem diferentes em cada fase, estes campos influenciam de forma diferente na medição de cada para-raios. Além disso, o instrumento de medição pode ser susceptível aos campos elétricos, podendo ser necessária a blindagem do instrumento.

Para se obter a forma de onda da corrente resistiva, podendo então descobrir os valores de pico da corrente resistiva e suas componentes harmônicas, foi desenvolvido um programa em LabView utilizando uma metodologia para a separação das correntes resistiva e capacitiva. O método consiste em descobrir o ponto em que a tensão é nula e, conseqüentemente, a corrente resistiva também. Desta forma, é possível se encontrar a corrente capacitiva máxima, a capacitância do para-raios e, então, a forma de onda da corrente capacitiva no tempo. Ao subtrair esta corrente da total, se obtém a forma de onda da corrente resistiva. Através da utilização do programa, podem ser verificados alguns fenômenos comentados anteriormente, como a corrente total ser predominantemente linear e a corrente resistiva e sua componente de 3ª harmônica apresentarem crescimento exponencial. A capacitância do para-raios também não é constante, apresentando decréscimo com o aumento da tensão aplicada sobre o para-raios.

Através de medições práticas, podem-se observar as variações nas correntes medidas. A corrente de fuga total apresentou variação com

relação à variação de temperatura e umidade relativa do ar, conforme o esperado. Entretanto, a componente de 3ª harmônica da corrente de fuga total não apresentou variação significativa nos valores medidos, se mostrando um indicador pouco sensível à variações no ambiente. Também se observa que o conteúdo harmônico da tensão da rede é de baixa amplitude, não interferindo significativamente no resultado medido. Através dos estudos realizados, foram propostos alguns cuidados na realização de medição, de modo a padronizá-la, como posicionar as sondas de corrente e campo elétrico nos mesmos locais e fazer a medição em dias mais secos e no período da manhã, quando a temperatura do para-raios está estabilizada com a temperatura externa. Desta maneira, pode-se aumentar a confiabilidade das medições, diminuindo as influências causadas por fatores externos sobre os valores obtidos.

Para a continuidade do trabalho aqui apresentado, são feitas algumas propostas.

- Modificação do programa de separação de correntes para que se dispense a medição da forma de onda de tensão, de modo que se possa fazer a medição de para-raios *on-line*;
- Estudar a variação da capacitância sobre o para-raios com a variação da tensão sobre ele e os efeitos sobre a corrente de fuga total;
- Realizar outras análises das influências simultâneas de temperatura e umidade relativa do ar sobre as medições de corrente total, corrente resistiva e componente de 3ª harmônica;
- Ampliar estudos sobre a influência dos harmônicos da tensão da rede sobre a componente de 3ª harmônica da corrente total em medições práticas.

9. Referências bibliográficas

- [1] SILVA, S. P., GONÇALVES, J. FRANCO, J. L. et al. Estudo de Avaliação de Desempenho de Redes de Distribuição frente a Descargas Atmosféricas. In: CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica. *Anais*. p. 99-102, 2003.
- [2] HAFFNER, S. Introdução aos Transitórios Magnéticos. Apostila. Março, 2006. Disponível em: http://slhaffner.phpnet.us/transitorios_eletromagneticos/transitorios01.pdf (ativo em 21/03/2011).
- [3] SILVEIRA, J. Modelagem e Análise de Varistores de Óxido Metálico de Zinco. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2009.
- [4] ÁLVARES, R. C. Diagnóstico de Falhas em Para-Raios Utilizando Termografia. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2008.
- [5] VIDEIRA, A. G., SANTOS, T. L., NEGRI, G. et al. Estudo do Comportamento de Campos Externos Próximos à Conexão de Terra de Para-raios de ZnO. In: MOMAG (Aug. 2010). *Anais*. 2010.
- [6] BRITTES, J. L. P., RIBEIRO, J. E. Desempenho de Linhas de Transmissão que Utilizam Para-raios de ZnO. Citenel – III Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica. 2005.
- [7] D’AJUZ, A., RESENDE, F. M., CARVALHO, F. M. S. et al. Equipamentos Elétricos, Rio de Janeiro, FURNAS, 1985.
- [8] BRITTO, T. M. Metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade Aplicada a Para-raios de Alta Tensão. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2006.
- [9] MACEDO, E. C. T., LIRA, J. G. A., COSTA, E. G., FREIRE R. C. S. Diagnóstico de Para-raios de Óxido de Zinco Utilizando Microcontrolador. In: SBSE 2006 - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. *Anais*. Campina Grande, 2006.
- [10] ZANOTTI JÚNIOR, M. Contribuição à Metodologia de Avaliação dos Para-raios do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo – USP, 2009.
- [11] INPE – Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. <http://www.inpe.br/webelat/homepage/> (ativo em 07/02/2011).
- [12] SAKSHAUG, E. C. A Brief History of AC Surge Arresters. IEEE Power Engineering Review, Agosto 1991. p. 11-13.

- [13] MEDEIROS, R. A. C., FREIRE, R. C. S., COSTA, E. G. et al. Monitoramento e Diagnóstico de Para-raios a ZnO Usando Redes Neurais Artificiais. In: VIII Semetro. *Anais*. João Pessoa, Brasil, 2009.
- [14] ABB. Para-raios de Alta Tensão Guia do Comprador. Disponível em: <http://www.abb.com.br/>, Produtos & Serviços, Produtos de Alta Tensão (ativo em 07/02/2011).
- [15] SCHEI, A. Diagnostic Techniques for Surge Arresters with Main Reference to On-Line Measurement of Resistive Leakage Current of Metal-Oxide Arresters. P1-05, Section 2000, CIGRÉ
- [16] International Electrotechnical Commission. Surge arresters - Part 5: Selection and Application Recommendations, IEC60099-5. Suíça, 2000.
- [17] MEISTER, A. Modelagem de Varistores de Óxido de Zinco para Estudos de Coordenação de Isolamento. Dissertação de Mestrado, UnB, 2005.
- [18] ABNT. NBR 6939:2000. Coordenação de isolamento – Procedimento.
- [19] DE FRANCO, J. L. Treinamento técnico: Aplicação de para-raios em subestações. ELETROSUL, Florianópolis, SC, Brasil, Outubro de 2008.
- [20] SOBRINHO, P. F. P., GONÇALVES F. D., BACEGA, W. R. et al. Avaliação do Estado e do Comportamento de Para-Raios de Média e Alta Tensão dos Tipos de Carboneto de Silício (SiC) e de Óxido Metálico de Zinco (ZnO). Relatório da CTEEP e ETPE.
- [21] ARAÚJO, D. C. P., MARTINS, A. J. A. L., SILVA N. S. A Experiência da CEMIG em Monitoramento e Diagnóstico de Para-Raios em Subestações de 69kV e 138kV. Minas Gerais, 2006.
- [22] BARRETO JUNIOR, J. T., CARVALHO, S. G., OLIVEIRA, M. J. et al. Diagnóstico de Campo da Condição Operativa de Para-raios de Óxido de Zinco em Subestações de 138kV. In: IX Encontro Regional Latino Americano da CIGRÉ, 2001, Puerto Iguazu. IX ERLAC, 2001.
- [23] International Electrotechnical Commission. Surge arresters - Part 4: Metal Oxide Surge Arresters Without Gap for A.C. Systems, IEC60099-4. Suíça, 2006.
- [24] LUNDQUIST, J., STENSTROM, L., SCHEI, A. et al. New Method for Measurement of the Resistive Leakage Current of Metal Oxide Surge Arresters in Service. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5 N°4, November 1990.

- [25] DE FRANCO, J. L. “Estudo das Propriedades Elétricas dos Varistores de ZnO na Região de Baixas Tensões Aplicadas”. Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba – UFPb, Campina Grande, Pb, Brasil, junho de 1993.
- [26] EFCAD, Electromagnetic Fields Computer Aided Design. Ver. 6.0, 2002. Disponível em: <http://www.grucad.ufsc.br/> (ativo em 07/02/2011).
- [27] SOUZA, R. T., COSTA, E. G., NAIDU, S. R., MAIA, M. J., Ponte Virtual para o Cálculo da Corrente Resistiva em Para-raios de ZnO. Universidade Federal de Campina Grande.
- [28] NETO, W. E. T., COSTA, E. G., SOUZA, R. T., et al. Monitoração e Diagnósticos de Para-raios a ZnO. IEEE Latin América Transactions, Vol. 4, No 3. Maio, 2006.
- [29] Mardira, K. P., Darveniza, M. and Saha, T. K. (2000). Search for New Diagnostics for Metal Oxide Surge Arrester. In: Proceedings of IEEE: 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM'2000). ICPADM 2000, Xian, China, (947-950). 21-26, Junho de 2006.
- [30] MEDEIROS, R. A. C., FREIRE, R. C. S, COSTA E. G. et al., Monitoramento e Diagnóstico de Para-raios a ZnO Usando Redes Neurais Artificiais. VIII Semetro. João Pessoa, Brasil. Junho de 2009.
- [31] NETO, E. T. W., Monitoramento e Diagnóstico de Para-raios a ZnO Através de Redes Neurais Artificiais. Tese de doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, 2007.
- [32] SOUZA, R. T. Medição e Análise Harmônica de Corrente de Fuga Resistiva em Varistores de ZnO. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2004.
- [33] KASTRUP FILHO, O., NIGRI, A., MALDONADO, P. et al. Aplicação de Para-raios ZnO em Linhas de 138kV. In: XIV SNPTTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belém, Brasil. 1997.
- [34] SILVEIRA, J., BATISTELA, N. J., KUO-PENG, P. et al. Influence of the Amplitude and Harmonic Distortion of the System Voltage in the Leakage Current of ZnO Varistors. Cigré International Technical Colloquium. Rio de Janeiro, Brasil. Sep. 2007.
- [35] MACEDO, E. C. T., Sistema de Avaliação do Nível de Degradação de Para-Raios de Óxido de Zinco. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

- [36] BARBOSA, F. B., Técnicas de Diagnósticos e Correlação com Fenômenos de Degradação em Varistores de ZnO. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2007.
- [37] TRANSINOR As. LCM – Surge Arrester Monitor – Experience From Condition Monitoring of Metal Oxide Surge Arresters in Service. Disponível em: http://www.doble.com/products/leakage_current_monitor.html (ativo em 21/03/2011).
- [38] TRIDELTA. Diagnostic Appliance for Current Analysis of Metal Oxide Arresters. Disponível em: <http://www.tridelta.de/> - Surge Arresters – Product – Accessories.
- [39] ZHU, H., RAGHUVeer, M. R. Influence of Harmonics in System Voltage on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostic. Conference on Electrical insulation and Dielectric Phenomena, 1999.
- [40] Zulkurnain A., Novizon, A.; A New Method to Extract the Resistive Component of the Metal Oxide Surge Arrester Leakage Current. PeCon 08, Johor Bahru. 1-3 Dec 2008. p. 399-402.
- [41] IEEE 62.11a: IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV): Amendment 1: Short-Circuit Tests for Station, Intermediate, and Distribution Arresters. IEEE Power Engineering Society, New York – NY, USA. 11 de julho de 2008.
- [42] IEEE 62.22: IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems. IEEE Power Engineering Society, New York – NY, USA. 9 de dezembro de 1997.